



UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE GEOLOGIA

RENATA CARNEIRO

**Análise de estabilidade em um talude de corte localizado na sub-bacia do
rio Sana sob a influência de fluxo transiente**

Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação em Geologia

RIO DE JANEIRO
DEZEMBRO, 2018

RENATA CARNEIRO

Análise de estabilidade em um talude de corte localizado na sub-bacia do rio Sana sob a influência de fluxo transiente

Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação em Geologia apresentado ao Instituto de Geociências da Universidade Federal do Rio de Janeiro – UFRJ, como requisito necessário para obtenção do grau de Bacharel em Geologia.

Orientadora: Andrea Ferreira Borges

RIO DE JANEIRO

DEZEMBRO, 2018

CARNEIRO, Renata

Análise de estabilidade em um talude de corte localizado na sub-bacia do rio Sana sob a influência de fluxo transiente / Renata Carneiro – Rio de Janeiro, 2018 – 126f. : 29,7cm.

Inclui anexos

Orientadora: Andrea Ferreira Borges

Instituto de Geociências – Departamento de Geologia – UFRJ, Trabalho de conclusão de curso para obtenção de grau de Bacharel em Geologia – IGL U08).

Referências Bibliográficas: p. 85

1. Estabilidade de taludes
2. Fluxo Transiente
3. Água subterrânea
4. Precipitação Pluviométrica
5. Sub-bacia do rio Sana

Renata Carneiro

Análise de estabilidade em um talude de corte localizado na sub-bacia do rio
Sana sob a influência de fluxo transiente

Aprovado por:

Profa. Dra. Andrea Ferreira Borges
Orientadora – Professora Associada
Instituto de Geociências – UFRJ

Eng. M.Sc. Rogério Cyrillo Gomes
Co-orientador – Engenheiro Civil M.Sc. em Geotecnia
Geotechnia Consultoria e Projetos

Prof. Dr. Atlas Vasconcelos Correa Neto
Professor Adjunto
Instituto de Geociências - UFRJ

Eng. Adriana Rezende de Castro
Engenheira Civil Especialista em Hidrologia e Hidráulica
Promon Engenharia

RIO DE JANEIRO
DEZEMBRO, 2018

DEDICATÓRIA

Dedico esta conquista ao meu pai Carlos Fernando, que não está presente em carne, mas se faz presente todos os dias em meu coração, à minha mãe Marilza, que é um presente de Deus em minha vida e ao meu avô Fernando Luiz, por ter sido um avô amoroso, ter investido tanto em mim e ser eternamente o meu exemplo.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente à Deus por todas as bênçãos recebidas por mim, nesses longos anos de trajetória, que me trouxeram até este momento. Agradeço por cada pessoa que cruzou o meu caminho e me apoiou, ensinou e incentivou durante esse período da minha vida. Me considero uma pessoa iluminada por ter tido tantas pessoas boas ao meu redor. Sozinhos nada somos.

Agradeço a todos os professores que tive durante o curso, que compartilharam comigo e com meus colegas, não somente o conhecimento, como também suas histórias e experiências.

Agradeço à minha mãe Marilza de Lima por seu eterno apoio, sempre cuidando de mim e ao meu grande amigo Rogério Cyrillo, por quem guardo um carinho e uma gratidão eterna, pela imensa ajuda nesse processo e por ter sido um dos principais impulsionadores da minha formação desde o início, nesses 15 anos que nos conhecemos.

Agradeço também especialmente à Adriana Rezende, Livia Pessanha, Fernanda Paredes, Anderson Moura, Renata Invenzioni e Diego de Faveri que estiveram presentes, principalmente, na reta final desse trabalho, auxiliando de inúmeras formas, seja técnica ou emocionalmente.

Agradeço ainda a todas as pessoas que não tiveram uma participação tão ativa nessa empreitada, porém são de extrema importância para a minha vida.

Agradeço à minha orientadora Profa. Andrea Borges pela paciência, gentileza e incentivo e por ter me ajudado a conseguir cumprir o prazo de entrega.

E por fim, ao Prof. Atlas Correa por sua grande gentileza em participar da minha banca avaliadora. À Profa. Helena Polivanov e ao Rafael Moreira por terem concedido os dados utilizados em minha monografia e ao departamento de Geologia como a todos os seus funcionários, sempre muito atenciosos e que muitas vezes me ajudaram ao longo do curso.

RESUMO

Avaliar a estabilidade de taludes é de grande importância no planejamento de ocupação urbana. Cada região possui suas especificidades físicas e conhecer as propriedades dos solos, bem como entender as relações entre os agentes presentes na dinâmica existente entre a mecânica dos solos e a mecânica dos fluidos é passo fundamental para a elaboração de projetos de engenharia mais seguros. Esse estudo tem como objetivo analisar as interações entre os pacotes terrosos constituintes de um talude de corte localizado na sub-bacia do rio Sana com um fluxo transiente de água ocasionado por um período de 17 dias consecutivos de precipitação, avaliando a sua estabilidade ao longo desse período, mediante a influência do escoamento sub-superficial desse fluido em suas camadas. Os resultados obtidos nesta análise foram comparados parametricamente com as cinco situações típicas dos ábacos de Hoek & Bray (1981), gerando discussões acerca das metodologias utilizadas. O talude estudado mostrou-se estável, mesmo sob influência de um grande volume de chuvas, comparado à média encontrada para essa região, porém os resultados mostraram que a análise de estabilidade de taludes requer um olhar mais crítico quanto às especificidades hidráulicas do talude a ser analisado, pois as relações existentes entre o meio sólido e o meio líquido determinam como ocorre esse equilíbrio. No caso do talude estudado, a condutividade hidráulica das camadas atuou de forma positiva ao equilíbrio de forças, porém em outras situações esse cenário pode não ser tão favorável quanto o estudado, o que justifica a importância de uma análise de estabilidade que leve em consideração critérios que vão além da altura do nível freático estimado ou aferido.

Palavras-chave: Estabilidade de taludes, fluxo transiente, água subterrânea, precipitação pluviométrica, sub-bacia do rio Sana.

ABSTRACT

It is of great importance on the planning of urban occupation to evaluate the stability of slopes. Every region possesses its physical specifics and to acknowledge the soil properties as well as to understand the interactions between the agents present in the existing dynamics between the mechanics of soils and the mechanics of fluids is a fundamental step to elaborate safer engineering projects. This research has the main goal to analyze the interactions between the soil packages of a cut slope in the sub basin of the Sana river with a transient water flow caused by a 17-day consecutive period of precipitation, evaluating its stability over this period by the influence the sub-superficial flow of this fluid in its layers. The results obtained in this study were parametrically compared to the five typical situations from the abacus of Hoek & Bray (1981), that lead to discussions about the methodologies used. The studied slope showed stable even under the influence of a great amount of rainfall, compared to the average found to this region. However, the results showed that the stability analyses of slopes requires a more critical regard for the hydraulic properties of the slope to be analyzed, because the existing relations between the solid and the liquid environment determine how the equilibrium occurs. Concerning the investigated slope, the hydraulic conductivity of the layers acted in a positive way to the equilibrium forces, although in other situations, this scenario can not be as favorable as the one studied, which justifies the importance of a stability analysis wich takes into consideration the criteria that goes above the height of the estimated or calibrated phreatic level.

Keywords: Slope stability, transient flow, groundwater, rainfall precipitation, sub-basin of the Sana river

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Localização da sub-bacia do rio Sana. – Imagem construída a partir de <i>shapefile</i> do banco de dados do INEA, utilizando o <i>software</i> ArcGIS. (a) Localização do Estado do Rio de Janeiro em relação ao Brasil. (b) Localização do Município de Macaé em relação ao Estado do Rio de Janeiro. (c) Localização da sub-bacia do rio Sana em relação ao município de Macaé.	25
Figura 2 – Vista lateral do talude estudado. – Google Street View da Google	25
Figura 3 – Evolução de um perfil de umidade em um solo – Silveira, Louzada e Beltrame (1993)	29
Figura 4 – Etapas do ciclo hidrológico – PAZ (2004).	30
Figura 5 – Exemplo de linhas de fluxo e equipotenciais – Tutorial Slide	33
Figura 6– Mapa de precipitação média anual (1) e mapa de temperatura média anual (2) da região da sub-bacia do rio Sana, adaptado de Freitas et al, 2015.	36
Figura 7– Mapa de balanço hídrico, período seco (1) e período chuvoso (2) da região da sub-bacia do rio Sana, adaptado de Freitas et al, 2015.	37
Figura 8 – Gráfico com a proporção de consistência de dados pluviométricos, por ano, no período de 1968 a 2017. Construído através do <i>software</i> Stata, a partir dos dados pluviométricos do banco de dados da ANA.	42
Figura 9 – Seção esquemática do talude. Construído através do <i>software</i> AutoCAD, a partir dos dados de Moreira (2017).	46
Figura 10 – Exemplo de superfície de ruptura combinada, mostrando a divisão em fatias e apresentação modelo de resultado do fator de segurança. – Adaptado de Tutorial 4 do <i>software</i> Slide.....	49
Figura 11 – Esquematização do método de Spencer (1967). – Fernandes (2014).....	50
Figura 12 – Seção típica da geometria do talude analisado – Construída através do <i>software</i> Slide.....	54
Figura 13 – Ábacos de Hoek & Bray (1981) – Wyllie & Mah (2005).	55
Figura 14 – Distribuição dos domínios crustais do Sudeste Brasileiro, extraído de Geraldtes et. al. (2012) apud Heilbron (1994).	63
Figura 15 – Mapa geológico simplificado da bacia do rio Sana, em escala 1:100.000 – Imagem construída a partir de <i>shapefiles</i> do banco de dados do INEA, utilizando o <i>software</i> ArcGIS, sendo o <i>shapefile</i> de geologia em escala 1:400.000 e o de hidrologia em 1:25.000, Datum SIRGAS 2000.	64

Figura 16 – Mapa de declividade e classes de relevo da bacia do rio Sana, em escala 1:100.000 – Imagem construída a partir de <i>shapefiles</i> do banco de dados do INEA, utilizando o <i>software</i> ArcGIS, com <i>shapefiles</i> em escala 1:25.000, Datum SIRGAS 2000.	65
Figura 17 – Mapa de classes de susceptibilidade a deslizamentos da bacia do rio Sana, em escala 1:100.000 – Imagem construída a partir de <i>shapefiles</i> do banco de dados do INEA, utilizando o <i>software</i> ArcGIS, com <i>shapefiles</i> em escala 1:25.000, Datum SIRGAS 2000.	66
Figura 18 – Mapa de cobertura com foco na área de floresta da bacia do rio Sana, em escala 1:100.000 – Imagem construída a partir de <i>shapefiles</i> do banco de dados do INEA, utilizando o <i>software</i> ArcGIS, com <i>shapefiles</i> em escala 1:25.000, Datum SIRGAS 2000.	67
Figura 19 – Mapa de tipos de solo da bacia do rio Sana, em escala 1:100.000 – Imagem construída a partir de <i>shapefiles</i> do banco de dados do INEA, utilizando o <i>software</i> ArcGIS, com <i>shapefiles</i> em escala 1:25.000, Datum SIRGAS 2000.	68
Figura 20 – Gráfico com a média da precipitação anual por estação, no período de 1968 a 2017.	69
Figura 21 – Mapa de isoietas pluviométricas da bacia do rio Sana, em escala 1:200.000 – Imagem construída a partir dos resultados da análise estatística dos dados pluviométricos do banco de dados da ANA e <i>shapefiles</i> do banco de dados do INEA, utilizando o <i>software</i> ArcGIS, com <i>shapefiles</i> em escala 1:25.000, Datum SIRGAS 2000.	70
Figura 22 – Gráfico com a média da precipitação anual da estação escolhida (Galdinópolis), no período de 1968 a 2017.	71
Figura 23 – Gráfico com a média da precipitação mensal da estação escolhida (Galdinópolis), no ano de 2009.	71
Figura 24 – Gráfico com a precipitação total diária da estação escolhida (Galdinópolis), em janeiro de 2009.	72
Figura 25 – Gráfico com os resultados das análises de estabilidade nas situações do ábaco de Hoek & Bray, através dos métodos de Bishop-Simplicado e Spencer.	74
Figura 26 – Resultado da análise de estabilidade para a situação do tipo 1 do ábaco de Hoek & Bray, através do método de Spencer.	74
Figura 27 – Resultado da análise de estabilidade para a situação do tipo 2 do ábaco de Hoek & Bray, através do método de Spencer.	75
Figura 28 – Resultado da análise de estabilidade para a situação do tipo 3 do ábaco de Hoek & Bray, através do método de Spencer.	75

Figura 29 – Resultado da análise de estabilidade para a situação do tipo 4 do ábaco de Hoek & Bray, através do método de Spencer.	76
Figura 30 – Resultado da análise de estabilidade para a situação do tipo 5 do ábaco de Hoek & Bray, através do método de Spencer.	76
Figura 31 – Comparação ao longo do tempo entre os métodos de Spencer e Bishop-Simplificado para obtenção do fator de segurança considerando o fluxo transiente.	77
Figura 32 – Fator de segurança considerando o fluxo transiente ao longo do tempo, com 20% do total precipitado infiltrado, através dos métodos de Spencer e Bishop-Simplificado.	78
Figura 33 – Fator de segurança considerando o fluxo transiente ao longo do tempo, com 30% do total precipitado infiltrado, através dos métodos de Spencer e Bishop-Simplificado.	79
Figura 34 – Fator de segurança considerando o fluxo transiente ao longo do tempo, com 40% do total precipitado infiltrado, através dos métodos de Spencer e Bishop-Simplificado.	79
Figura 35 – Fator de segurança considerando o fluxo transiente ao longo do tempo, com 50% do total precipitado infiltrado, através dos métodos de Spencer e Bishop-Simplificado.	80
Figura 36 – Fator de segurança da seção crítica considerando o fluxo transiente ao longo do tempo, com 20% do total precipitado infiltrado, através dos métodos de Spencer. Seção referente ao dia 24/01/2009, apresentando a flutuação do nível freático em todas as seções ao longo do período.	81
Figura 37 – Fator de segurança da seção crítica considerando o fluxo transiente ao longo do tempo, com 30% do total precipitado infiltrado, através dos métodos de Spencer. Seção referente ao dia 20/01/2009, apresentando a flutuação do nível freático em todas as seções ao longo do período.	81
Figura 38 – Fator de segurança da seção crítica considerando o fluxo transiente ao longo do tempo, com 40% do total precipitado infiltrado, através dos métodos de Spencer. Seção referente ao dia 25/01/2009, apresentando a flutuação do nível freático em todas as seções ao longo do período.	82
Figura 39 – Fator de segurança da seção crítica considerando o fluxo transiente ao longo do tempo, com 50% do total precipitado infiltrado, através dos métodos de Spencer. Seção referente ao dia 24/01/2009, apresentando a flutuação do nível freático em todas as seções ao longo do período.	82

Figura 40 – Resultado da análise de estabilidade do dia inicial (14/01/2009), anterior ao período de precipitação analisado, com 20% de infiltração, através do método de Spencer.....	87
Figura 41 – Resultado da análise de estabilidade do 1º dia do período analisado (15/01/2009), com 20% de infiltração, através do método de Spencer.....	88
Figura 42 – Resultado da análise de estabilidade do 2º dia do período analisado (16/01/2009), com 20% de infiltração, através do método de Spencer.....	88
Figura 43 – Resultado da análise de estabilidade do 3º dia do período analisado (17/01/2009), com 20% de infiltração, através do método de Spencer.....	89
Figura 44 – Resultado da análise de estabilidade do 4º dia do período analisado (18/01/2009), com 20% de infiltração, através do método de Spencer.....	89
Figura 45 – Resultado da análise de estabilidade do 5º dia do período analisado (19/01/2009), com 20% de infiltração, através do método de Spencer.....	90
Figura 46 – Resultado da análise de estabilidade do 6º dia do período analisado (20/01/2009), com 20% de infiltração, através do método de Spencer.....	90
Figura 47 – Resultado da análise de estabilidade do 7º dia do período analisado (21/01/2009), com 20% de infiltração, através do método de Spencer.....	91
Figura 48 – Resultado da análise de estabilidade do 8º dia do período analisado (22/01/2009), com 20% de infiltração, através do método de Spencer.....	91
Figura 49 – Resultado da análise de estabilidade do 9º dia do período analisado (23/01/2009), com 20% de infiltração, através do método de Spencer.....	92
Figura 50 – Resultado da análise de estabilidade do 10º dia do período analisado (24/01/2009), com 20% de infiltração, através do método de Spencer.....	92
Figura 51 – Resultado da análise de estabilidade do 11º dia do período analisado (25/01/2009), com 20% de infiltração, através do método de Spencer.....	93
Figura 52 – Resultado da análise de estabilidade do 12º dia do período analisado (26/01/2009), com 20% de infiltração, através do método de Spencer.....	93
Figura 53 – Resultado da análise de estabilidade do 13º dia do período analisado (27/01/2009), com 20% de infiltração, através do método de Spencer.....	94
Figura 54 – Resultado da análise de estabilidade do 14º dia do período analisado (28/01/2009), com 20% de infiltração, através do método de Spencer.....	94
Figura 55 – Resultado da análise de estabilidade do 15º dia do período analisado (29/01/2009), com 20% de infiltração, através do método de Spencer.....	95
Figura 56 – Resultado da análise de estabilidade do 16º dia do período analisado (30/01/2009), com 20% de infiltração, através do método de Spencer.....	95

Figura 57 – Resultado da análise de estabilidade do 17º dia do período analisado (31/01/2009), com 20% de infiltração, através do método de Spencer.....	96
Figura 58 – Resultado da análise de estabilidade do dia inicial (14/01/2009), anterior ao período de precipitação analisado, com 30% de infiltração, através do método de Spencer.....	97
Figura 59 – Resultado da análise de estabilidade do 1º dia do período analisado (15/01/2009), com 30% de infiltração, através do método de Spencer.....	98
Figura 60 – Resultado da análise de estabilidade do 2º dia do período analisado (16/01/2009), com 30% de infiltração, através do método de Spencer.....	98
Figura 61 – Resultado da análise de estabilidade do 3º dia do período analisado (17/01/2009), com 30% de infiltração, através do método de Spencer.....	99
Figura 62 – Resultado da análise de estabilidade do 4º dia do período analisado (18/01/2009), com 30% de infiltração, através do método de Spencer.....	99
Figura 63 – Resultado da análise de estabilidade do 5º dia do período analisado (19/01/2009), com 30% de infiltração, através do método de Spencer.....	100
Figura 64 – Resultado da análise de estabilidade do 6º dia do período analisado (20/01/2009), com 30% de infiltração, através do método de Spencer.....	100
Figura 65 – Resultado da análise de estabilidade do 7º dia do período analisado (21/01/2009), com 30% de infiltração, através do método de Spencer.....	101
Figura 66 – Resultado da análise de estabilidade do 8º dia do período analisado (22/01/2009), com 30% de infiltração, através do método de Spencer.....	101
Figura 67 – Resultado da análise de estabilidade do 9º dia do período analisado (23/01/2009), com 30% de infiltração, através do método de Spencer.....	102
Figura 68 – Resultado da análise de estabilidade do 10º dia do período analisado (24/01/2009), com 30% de infiltração, através do método de Spencer.....	102
Figura 69 – Resultado da análise de estabilidade do 11º dia do período analisado (25/01/2009), com 30% de infiltração, através do método de Spencer.....	103
Figura 70 – Resultado da análise de estabilidade do 12º dia do período analisado (26/01/2009), com 30% de infiltração, através do método de Spencer.....	103
Figura 71 – Resultado da análise de estabilidade do 13º dia do período analisado (27/01/2009), com 30% de infiltração, através do método de Spencer.....	104
Figura 72 – Resultado da análise de estabilidade do 14º dia do período analisado (28/01/2009), com 30% de infiltração, através do método de Spencer.....	104
Figura 73 – Resultado da análise de estabilidade do 15º dia do período analisado (29/01/2009), com 30% de infiltração, através do método de Spencer.....	105

Figura 74 – Resultado da análise de estabilidade do 16º dia do período analisado (30/01/2009), com 30% de infiltração, através do método de Spencer.....	105
Figura 75 – Resultado da análise de estabilidade do 17º dia do período analisado (31/01/2009), com 30% de infiltração, através do método de Spencer.....	106
Figura 76 – Resultado da análise de estabilidade do dia inicial (14/01/2009), anterior ao período de precipitação analisado, com 40% de infiltração, através do método de Spencer.....	107
Figura 77 – Resultado da análise de estabilidade do 1º dia do período analisado (15/01/2009), com 40% de infiltração, através do método de Spencer.....	108
Figura 78 – Resultado da análise de estabilidade do 2º dia do período analisado (16/01/2009), com 40% de infiltração, através do método de Spencer.....	108
Figura 79 – Resultado da análise de estabilidade do 3º dia do período analisado (17/01/2009), com 40% de infiltração, através do método de Spencer.....	109
Figura 80 – Resultado da análise de estabilidade do 4º dia do período analisado (18/01/2009), com 40% de infiltração, através do método de Spencer.....	109
Figura 81 – Resultado da análise de estabilidade do 5º dia do período analisado (19/01/2009), com 40% de infiltração, através do método de Spencer.....	110
Figura 82 – Resultado da análise de estabilidade do 6º dia do período analisado (20/01/2009), com 40% de infiltração, através do método de Spencer.....	110
Figura 83 – Resultado da análise de estabilidade do 7º dia do período analisado (21/01/2009), com 40% de infiltração, através do método de Spencer.....	111
Figura 84 – Resultado da análise de estabilidade do 8º dia do período analisado (22/01/2009), com 40% de infiltração, através do método de Spencer.....	111
Figura 85 – Resultado da análise de estabilidade do 9º dia do período analisado (23/01/2009), com 40% de infiltração, através do método de Spencer.....	112
Figura 86 – Resultado da análise de estabilidade do 10º dia do período analisado (24/01/2009), com 40% de infiltração, através do método de Spencer.....	112
Figura 87 – Resultado da análise de estabilidade do 11º dia do período analisado (25/01/2009), com 40% de infiltração, através do método de Spencer.....	113
Figura 88 – Resultado da análise de estabilidade do 12º dia do período analisado (26/01/2009), com 40% de infiltração, através do método de Spencer.....	113
Figura 89 – Resultado da análise de estabilidade do 13º dia do período analisado (27/01/2009), com 40% de infiltração, através do método de Spencer.....	114
Figura 90 – Resultado da análise de estabilidade do 14º dia do período analisado (28/01/2009), com 40% de infiltração, através do método de Spencer.....	114

Figura 91 – Resultado da análise de estabilidade do 15º dia do período analisado (29/01/2009), com 40% de infiltração, através do método de Spencer.....	115
Figura 92 – Resultado da análise de estabilidade do 16º dia do período analisado (30/01/2009), com 40% de infiltração, através do método de Spencer.....	115
Figura 93 – Resultado da análise de estabilidade do 17º dia do período analisado (31/01/2009), com 40% de infiltração, através do método de Spencer.....	116
Figura 94 – Resultado da análise de estabilidade do dia inicial (14/01/2009), anterior ao período de precipitação analisado, com 50% de infiltração, através do método de Spencer.....	117
Figura 95 – Resultado da análise de estabilidade do 1º dia do período analisado (15/01/2009), com 50% de infiltração, através do método de Spencer.....	118
Figura 96 – Resultado da análise de estabilidade do 2º dia do período analisado (16/01/2009), com 50% de infiltração, através do método de Spencer.....	118
Figura 97 – Resultado da análise de estabilidade do 3º dia do período analisado (17/01/2009), com 50% de infiltração, através do método de Spencer.....	119
Figura 98 – Resultado da análise de estabilidade do 4º dia do período analisado (18/01/2009), com 50% de infiltração, através do método de Spencer.....	119
Figura 99 – Resultado da análise de estabilidade do 5º dia do período analisado (19/01/2009), com 50% de infiltração, através do método de Spencer.....	120
Figura 100 – Resultado da análise de estabilidade do 6º dia do período analisado (20/01/2009), com 50% de infiltração, através do método de Spencer.....	120
Figura 101 – Resultado da análise de estabilidade do 7º dia do período analisado (21/01/2009), com 50% de infiltração, através do método de Spencer.....	121
Figura 102 – Resultado da análise de estabilidade do 8º dia do período analisado (22/01/2009), com 50% de infiltração, através do método de Spencer.....	121
Figura 103 – Resultado da análise de estabilidade do 9º dia do período analisado (23/01/2009), com 50% de infiltração, através do método de Spencer.....	122
Figura 104 – Resultado da análise de estabilidade do 10º dia do período analisado (24/01/2009), com 50% de infiltração, através do método de Spencer.....	122
Figura 105 – Resultado da análise de estabilidade do 11º dia do período analisado (25/01/2009), com 50% de infiltração, através do método de Spencer.....	123
Figura 106 – Resultado da análise de estabilidade do 12º dia do período analisado (26/01/2009), com 50% de infiltração, através do método de Spencer.....	123
Figura 107 – Resultado da análise de estabilidade do 13º dia do período analisado (27/01/2009), com 50% de infiltração, através do método de Spencer.....	124

Figura 108 – Resultado da análise de estabilidade do 14º dia do período analisado (28/01/2009), com 50% de infiltração, através do método de Spencer.....	124
Figura 109 – Resultado da análise de estabilidade do 15º dia do período analisado (29/01/2009), com 50% de infiltração, através do método de Spencer.....	125
Figura 110 – Resultado da análise de estabilidade do 16º dia do período analisado (30/01/2009), com 50% de infiltração, através do método de Spencer.....	125
Figura 111 – Resultado da análise de estabilidade do 17º dia do período analisado (31/01/2009), com 50% de infiltração, através do método de Spencer.....	126

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Resultados de ensaio de cisalhamento direto – Moreira (2017).....	53
Tabela 2 – Resultados da caracterização – Moreira (2017).....	53
Tabela 3 – Faixa de valores de permeabilidade intrínseca e condutividade hidráulica à água para vários materiais não consolidados – Betim (2013), apud Fetter (2001).	57
Tabela 4 – Parâmetros de umidade residual com relação ao teor de argila – Carducci et al (2011).	59
Tabela 5 – Propriedades hidráulicas dos horizontes utilizadas na construção do modelo transiente.	59
Tabela 6 – Taxas de infiltração utilizadas nos modelos de fluxo transiente.	61
Tabela 7 – Resumo dos dados pluviométricos de 50 anos das 8 estações selecionadas ao redor da sub-bacia do rio Sana.	70

LISTA DE ABREVIATURAS

ANA – Agência Nacional de Águas;

APA – Área de Proteção Ambiental;

CPRM – Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais;

ETP – Evapotranspiração;

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística;

INEA - Instituto Nacional do Ambiente;

INMET - Instituto Nacional de Meteorologia;

MDE – Modelo Digital de Elevação;

NA – Nível de Água;

SEA – Secretaria de Estado do Ambiente.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	21
1.1. MOTIVAÇÃO E OBJETIVO	22
1.2. A REGIÃO DO SANA	24
1.3. ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO.....	26
2. A ÁGUA COMO AGENTE TRANSFORMADOR	28
2.1. POROSIDADE, PERMEABILIDADE E FLUXO.....	31
2.2. DECLIVIDADE E COBERTURA	33
2.3. DURAÇÃO E INTENSIDADE	34
2.4. TIPOS DE CHUVA	34
2.5. CLIMA.....	35
3. AQUISIÇÃO DE DADOS.....	38
3.1. BANCO DE DADOS DO INEA	38
3.2. BANCO DE DADOS DA ANA.....	39
3.3. PARÂMETROS LABORATORIAIS.....	40
4. TRATAMENTO DE DADOS	41
4.1. DADOS PLUVIOMÉTRICOS.....	41
4.2. DADOS GEOESPACIAIS.....	45
4.3. DADOS GEOTÉCNICOS	46
5. FUNDAMENTOS, MATERIAIS E MÉTODOS DA ANÁLISE	48
5.1. MÉTODO DE ANÁLISE SELECIONADO.....	49
5.2. DEFINIÇÃO DAS PROPRIEDADES DA SEÇÃO	52
5.3. A ANÁLISE POR ÁBACO	55
5.4. O MÓDULO DE FLUXO TRANSIENTE.....	56
6. GEOLOGIA	62
7. ASPECTOS FISIAGRÁFICOS	65
8. PLUVIOMETRIA.....	69
9. RESULTADOS DAS ANÁLISES DE ESTABILIDADE	73
9.1. ANÁLISE POR ÁBACO	74
9.2. MODELO COM FLUXO TRANSIENTE	77
10. CONCLUSÃO.....	83

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	85
ANEXO A	87
ANEXO B	97
ANEXO C	107
ANEXO D	117

1. INTRODUÇÃO

Esse estudo é um trabalho de conclusão do curso de Geologia da Universidade Federal do Rio de Janeiro. Sua proposta surgiu do interesse da autora em aplicar os conhecimentos obtidos durante o curso, em um assunto que pertencesse ao escopo da Geologia de Engenharia, devido à afinidade da autora com esse segmento da grande área Geologia.

Moreira (2017) realizou um vasto estudo em sua dissertação, nessa área, onde caracterizou várias propriedades de um perfil de solo localizado na sub-bacia do rio Sana, através de ensaios de laboratório de amostras coletadas em um talude de corte, bem como observações das feições erosivas em mapeamento de superfície realizado no local, com o objetivo de caracterizar a erodibilidade desses solos.

Valendo-se da oportunidade de acesso aos resultados obtidos nesse estudo, a autora e sua orientadora realizaram o desenho da presente pesquisa, onde o objetivo principal inicialmente era, mediante o conhecimento das propriedades dos solos caracterizados por Moreira (2017), realizar a análise de estabilidade do talude de corte no qual foram coletadas as amostras, de modo a complementar o estudo do autor.

Porém, ao longo do desenvolvimento do desenho da pesquisa, surgiram questionamentos que motivaram a autora a ampliar o olhar sobre essa análise. Havia o interesse prévio de entender como os condicionantes naturais atuam no processo erosivo. Para dissertar sobre a relação existente entre esses condicionantes com o tema em pauta, a autora decidiu incluir um estudo estatístico da pluviometria da área de forma a criar um modelo de fluxo transiente e estudar a influência desse fluxo na estabilidade do talude estudado.

Esse modelo, mais sofisticado, onde é incluída no estudo mais uma variável do conjunto de fatores que se correlacionam no processo erosivo, foi comparado ao modelo de análise com auxílio de ábacos de Hoek & Bray (1981), que é um modelo muito utilizado no meio profissional, de forma a sanar a escassez de informações que usualmente ocorre.

Essa comparação gerou discussões interessantes sobre a correlação existente entre esses fatores, evidenciando que existem muitas incertezas sobre essa problemática e o conhecimento das propriedades hidráulicas dos solos e o comportamento dos fluidos em subsuperfície aplicados a uma análise de estabilidade pode gerar resultados mais refinados e mais próximos das condições reais.

Essa pesquisa envolve apenas trabalho de gabinete, não tendo sido possível a visita a campo para aferir as propriedades utilizadas. Grande parte dos dados necessários a esse trabalho foram obtidos no estudo realizado por Moreira (2017), também foram coletados dados da Agência Nacional de Água e do Instituto Nacional do Ambiente. Para complementar as propriedades dos solos necessárias à criação do modelo foi realizada uma pesquisa bibliográfica.

Apesar da pontualidade da pesquisa, foram gerados mapas com os aspectos geológicos e fisiográficos de toda a sub-bacia, no intuito de gerar, primeiramente, um entendimento do padrão hidrológico de todo o sistema que constitui a sub-bacia. Segundo, porque o perfil de solo estudado por Moreira (2017), segundo o autor, tem características diagnósticas dos solos da região. Como observado nos mapas gerados para toda a bacia, o padrão de solos, relevo e outros aspectos evidenciados ao longo do trabalho se repete na maior parte da sub-bacia. Com isso, e levando em conta que as propriedades hidráulicas intrínsecas do solo tendem a variar pouco para um mesmo solo de um mesmo local de uma mesma origem, espera-se, com esse trabalho, gerar informações que possam auxiliar estudos futuros na área ou projetos de engenharia.

1.1. MOTIVAÇÃO E OBJETIVO

A avaliação do comportamento geomecânico de pacotes terrosos, sob a influência de agentes transformadores da fisiografia, é de extrema importância no planejamento urbano. Com o crescimento da ocupação de terras, para diferentes usos de solo, a sociedade vem sentindo cada vez mais os efeitos dos

processos erosivos que atingem áreas susceptíveis a esse mecanismo. Esses processos acontecem naturalmente, seja com a presença do homem ou não; porém essa intervenção causada pelo homem gera impactos no meio ambiente que interferem muitas das vezes de forma negativa, causando acidentes.

Estudos que permitam o conhecimento das características físicas e resistivas dos pacotes de diferentes tipos de solos; estudos sobre o comportamento dos agentes erosivos e análises de estabilidade que levem em consideração esses fatores, contribuem, não somente para auxiliar a elaboração de projetos de engenharia, atenuando o risco de impacto no meio ambiente, dando subsídios para um uso de terras mais responsável, como também agregam ao entendimento dos processos físicos que implicam na erosão.

Apesar dos projetos de caráter geológico realizados na área, contando com informações sobre ocorrências de deslizamentos, padrão geológico-estrutural e geomorfológico, são poucos estudos encontrados sobre o comportamento geomecânico dos terrenos que compreendem o local. Moreira (2017) contribuiu para esse entendimento, através das caracterizações realizadas em seu estudo. O autor, assim como outros, estudaram as feições erosivas da região, o que é de grande ajuda para entender quais áreas erodem mais do que outras e como e por que essa erosão ocorre.

Projetos de engenharia nem sempre contam com os recursos adequados para a realização de todos os ensaios e estudos necessários para a sua elaboração. Por conta disso, é comum a previsão paramétrica em análises de estabilidade em cortes de talude. O conhecimento mais aprofundado das características do terreno que se pretende cortar é fundamental para a execução de um projeto seguro.

De modo a suprir uma lacuna existente nos trabalhos anteriores realizados na área, esse estudo tem como objetivo principal realizar a análise de estabilidade de um talude de corte situado na sub-bacia do rio Sana – localizada no Município de Macaé, RJ – considerando a influência do fluxo transiente ocasionado pela precipitação pluviométrica, através do *software* Slide da Rockscience.

Como objetivos secundários – necessários para alcançar o principal – tem-se a análise estatística de dados pluviométricos através do *software* Stata, a elaboração de mapas através do *software* ArcGIS e a construção do modelo de fluxo transiente. Além disso, foi realizada um outro conjunto de análises de estabilidade, através dos ábacos de Hoek & Bray (1981), que são usualmente utilizados em estudos geotécnicos em que não se tem informações sobre o nível freático, sendo necessário a utilização de análise paramétrica.

Para criação dos resultados apresentados nesse estudo, foram coletadas informações dos bancos de dados do Instituto Nacional do Ambiente – INEA, da Agência Nacional de Águas – ANA e resultados obtidos em estudo prévio na área, realizado por Moreira (2017). Além disso, foi realizada pesquisa bibliográfica sobre as técnicas metodológicas utilizadas, bem como sobre os aspectos fisiográficos da região, que serviram de embasamento para as análises realizadas. Foram utilizados os *softwares* ArcGIS, QGIS, AutoCAD, Slide, Stata e Excel para o tratamento das informações coletadas e geração dos resultados.

1.2. A REGIÃO DO SANA

Fundado por volta de 1850, durante o ciclo do café, o distrito do Sana é um verdadeiro paraíso ecológico, tendo sido transformado em Área de Proteção Ambiental – APA, em 2002. Sua área é marcada por montanhas íngremes, recortadas por uma rede de drenagem robusta que conflui a um vale encaixado onde corre o rio Sana, com 17km de extensão desde sua cabeceira até o ponto em que encontra o rio Macaé, que recebe as águas dessa sub-bacia.

Além do impulso econômico causado pelo turismo, que gerou um aumento da ocupação do distrito do Sana, essa região tem histórico de atividades extremamente degradantes ao meio ambiente, como o cultivo de café e a agropecuária, gerando retração da área original de vegetação caracterizada pela Mata Atlântica, como aponta Duarte (2015).

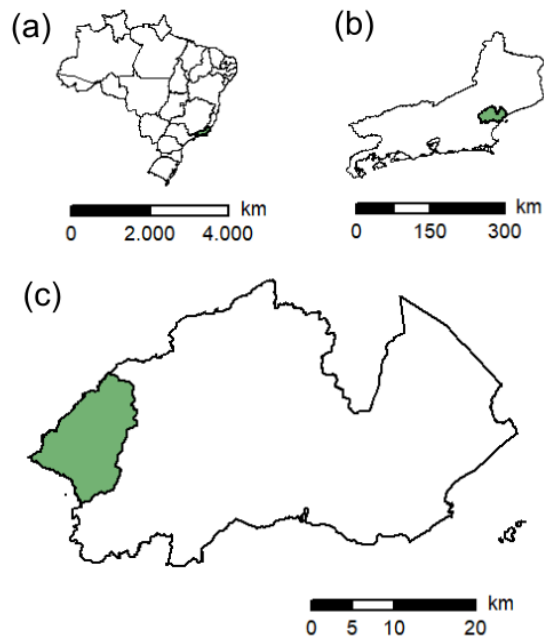


Figura 1 – Localização da sub-bacia do rio Sana. – Imagem construída a partir de *shapefile* do banco de dados do INEA, utilizando o *software* ArcGIS. (a) Localização do Estado do Rio de Janeiro em relação ao Brasil. (b) Localização do Município de Macaé em relação ao Estado do Rio de Janeiro. (c) Localização da sub-bacia do rio Sana em relação ao município de Macaé.



Figura 2 – Vista lateral do talude estudado. – Google Street View.

1.3. ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

Devido às várias etapas que perfazem esse estudo, optou-se pela apresentação em formato de sequência não tradicional, de forma a facilitar o entendimento do leitor sobre o fluxograma estabelecido durante a elaboração.

Para alcançar o objetivo principal desse estudo, foi necessário criar uma base de dados como subsídio às análises de interesse. Essa etapa construtiva da base consistiu em vários passos, desde a aquisição dos dados até os resultados obtidos, que foram utilizados para a análise de estabilidade. De forma a organizar essas etapas em blocos, seguindo o raciocínio de construção da pesquisa, esse estudo apresenta a seguinte estrutura, nos capítulos que se seguem:

No capítulo 2 é apresentada uma revisão sobre as principais propriedades referentes à atuação da água como agente erosivo. Esse capítulo tem como intuito resumir e apresentar as definições encontradas na literatura sobre os termos apresentados ao longo desse trabalho.

Os capítulos 3 e 4 tratam da aquisição e tratamento de dados, respectivamente. Como foram usados dados de diferentes bases e referências, esses capítulos têm como objetivo indicar ao leitor a procedência dos dados utilizados e os tratamentos necessários para filtrar e corrigi-los para a construção da base final a ser utilizada para a análise.

O capítulo 5 é dedicado aos fundamentos e métodos utilizados para a análise de estabilidade. Apesar dos capítulos anteriores apresentarem etapas metodológicas, optou-se pela apresentação segregada para dar o enfoque necessário aos objetivos do trabalho e não confundir o leitor.

Os capítulos 6 e 7 tratam das características geológicas e fisiográficas da sub-bacia do rio Sana, respectivamente. Optou-se pela apresentação desses capítulos em ordem diferente da tradicional, não somente para apresentá-los após o detalhamento do processo construtivo dos mesmos, como também para apresentá-los próximo aos resultados, de forma a facilitar o entendimento do leitor quanto às correlações apresentadas ao final do estudo.

O capítulo 8 é dedicado aos resultados obtidos da análise estatística dos dados pluviométricos, necessária para a obtenção dos valores a serem utilizados na construção do modelo de fluxo transiente considerado na análise de estabilidade. E por fim o capítulo 9 apresenta os resultados da análise de estabilidade com uma discussão final, apresentada no capítulo 10.

Além da conclusão e referências bibliográficas, o trabalho apresenta no final 4 anexos, referentes aos resultados individuais das seções analisadas no programa Slide.

2. A ÁGUA COMO AGENTE TRANSFORMADOR

Os dois agentes mais importantes no processo de erosão dos solos são o vento e a água. Quanto mais desnudada uma superfície de solo for – ou seja, quanto menor for a sua cobertura vegetal – maior será a atuação desses dois agentes. Por conta disso, áreas em que são realizadas alterações no aspecto fisiográfico, com a retração da vegetação original, tem a sua susceptibilidade erosiva aumentada. Essa retração de vegetação é muito comum devido à expansão de ocupação de terrenos, pelo homem, cada vez mais acelerada.

A erosão causada pela água é comumente evidenciada em regiões com elevadas precipitações e de topografia acidentada. Segundo a apostila de capacitação da ANA sobre práticas mecânicas de conservação de água e solo, encontrada em seu site, essa erosão pode ser classificada em:

- Erosão pluvial: causada pela ação das chuvas;
- Erosão fluvial: causada pela ação dos rios;
- Erosão lacustre: causada pela ação dos lagos;
- Erosão marinha: causada pela ação dos mares.

O enfoque desse trabalho é na erosão pluvial, e para entender como essa água proveniente das chuvas influencia no comportamento geomecânico dos pacotes terrosos, é preciso, antes, entender como esse processo ocorre. A água tem um papel importante na geologia e sua atuação controla vários processos geológicos como o metassomatismo, formação de relevos, ruptura de encostas e outros.

A água pluvial passa por vários processos antes de se acumular em subsuperfície. Quando essa água chega à superfície, ela infiltra até o limite que o solo é capaz de absorver e o restante escoar superficialmente, através de drenagens, até chegar às partes mais baixas da bacia hidrográfica, onde se encontram os rios, que transportam esse volume hídrico para outros rios ou para o mar.

Dependendo da temperatura do local, uma parte dessa água, ao invés de escoar, evapora e retorna à atmosfera. Quanto mais quente for o ambiente em que ocorre esse processo, maior será a taxa de evaporação da água. Por isso, o clima é um fator extremamente importante a ser entendido. A água que efetivamente infiltra e escoia sub-superficialmente pelas camadas de solo não é, portanto, a mesma quantidade de água que precipita. Esse escoamento em subsuperfície pode acontecer verticalmente nas camadas não-saturadas, em direção ao lençol freático (percolação); sub-horizontalmente nas camadas não saturadas ou saturadas suspensas (interfluxo); ou sub-horizontalmente nas camadas saturadas (fluxo subterrâneo).

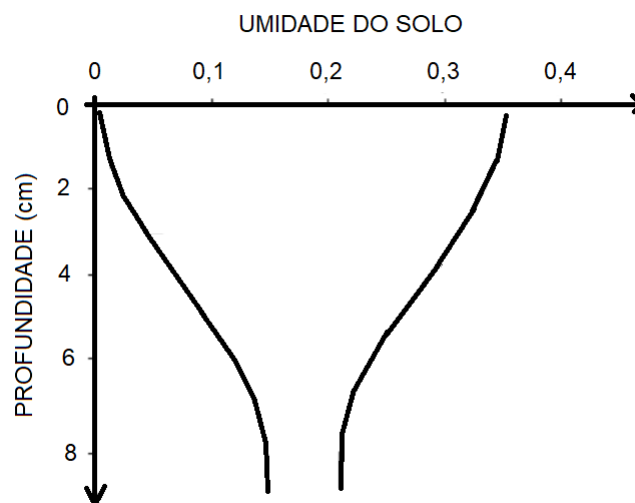


Figura 3 – Evolução de um perfil de umidade em um solo – Silveira, Louzada e Beltrame (1993)

Quando o aporte de água é superior em intensidade ou igual à capacidade de infiltração de um solo a curva de taxa infiltração coincide com a curva da capacidade de infiltração do solo. Quando a infiltração em um solo cessa, parte da água infiltrada é propagada para as camadas mais profundas e parte é transferida para a atmosfera por evaporação direta ou transpiração da camada vegetal. (SILVEIRA, LOUZADA e BELTRAME, 1993)

Esses processos mencionados são apenas alguns processos que a água passa no seu ciclo. Além das interações chuva-superfície-subsuperfície, existem outras interações, como por exemplo, a chuva que precipita em áreas de floresta. A presença de floresta influencia diretamente na quantidade de água

que chega na superfície, pois a vegetação capta parte dessa água precipitada, configurando sua interação particular com as chuvas. Essa água captada não é totalmente absorvida pela vegetação, sendo esse excesso descartado, seja para o solo por escoamento ou de volta à atmosfera por transpiração.

Outra condição existente é a chuva que precipita sobre os corpos d'água. Essa água que contribui com o aporte hídrico, tem uma parte dela evaporada de volta à atmosfera. A quantidade de água evaporada de superfícies d'água em conjunto com a transpirada das vegetações é chamada de evapotranspiração – ETP. Essas duas medidas são comumente estudadas juntas, devido à dificuldade em medir a transpiração.

Essas interações configuram o ciclo hidrológico que é apresentado de maneira simplificada na Figura 4. Esse ciclo pode ser representado pelo balanço hídrico, onde todas as saídas d'água são diminuídas das entradas para calcular a variação do armazenamento.

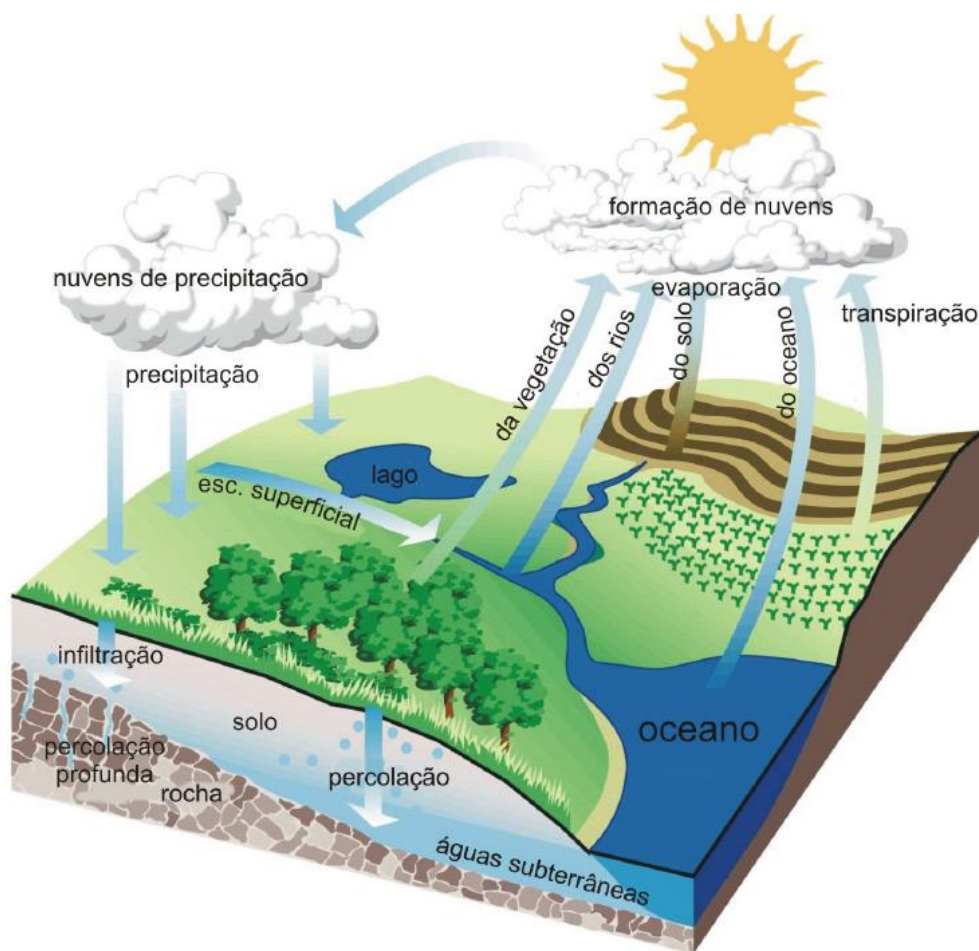


Figura 4 – Etapas do ciclo hidrológico – PAZ (2004).

A parcela de água dessa precipitação que infiltra no terreno, depende de vários fatores como a porosidade e permeabilidade das camadas, a declividade do terreno, o tipo de vegetação que o cobre e o tipo de chuva que ocorre sobre ele. Após o solo atingir a sua capacidade de infiltração, a parcela não infiltrada desse volume de água que precipita na superfície, forma filetes no relevo e escoar superficialmente até as áreas mais baixas. (SILVEIRA, LOUZADA e BELTRAME, 1993)

2.1. POROSIDADE, PERMEABILIDADE E FLUXO

A porosidade é definida como a razão entre o volume de vazios e o volume total de uma amostra de solo. (CAPUTO, 1980). As partículas de solo costumam formar grupamentos, se apresentando, de uma maneira geral, de forma agregada. Entre esses grupamentos se encontram os poros que podem estar conectados entre si ou não. É através desses poros (porosidade primária) e através de fraturas desenvolvidas posteriormente (porosidade secundária) que os fluxos se movem dependendo da permeabilidade. Esse movimento vai depender da quantidade de poros que um solo tem, bem como as suas características.

Se tratando da porosidade primária, para que o fluxo passe por um pacote, ele precisa contornar as partículas sólidas (os grãos), através dos vazios. Quando esses vazios se encontram conectados (porosidade efetiva), o fluxo passa mais rapidamente, encontrando menos obstáculos do que em um solo que contenha mais poros isolados.

Geralmente a porosidade total cresce com a diminuição do tamanho dos grãos, porém, é importante ressaltar que um pacote classificado como poroso, não necessariamente é um bom condutor de fluidos, pois sua porosidade total pode ser elevada e a efetiva ser baixa, como o caso das argilas.

Pacotes de sedimentos mal selecionados tem geralmente porosidades mais baixas, devido ao preenchimento dos espaços por variados tamanhos. Com

isso, uma das variáveis que se faz importante conhecer é a granulometria do pacote estudado.

A permeabilidade tem ligação com a porosidade, pois, é através dos poros que o fluxo ocorre. Existem dois tipos de permeabilidade: a intrínseca e a absoluta. A permeabilidade intrínseca é a propriedade que o solo apresenta de permitir o escoamento da água através dele, sendo expresso numericamente pelo coeficiente de permeabilidade. (CAPUTO, 1980). Esse coeficiente varia dependendo do tipo de solo, e também para o mesmo tipo de solo, devido à temperatura e índice de vazios. Caputo (1980) ressalta que quanto maior a temperatura, menor é a viscosidade da água, aumentando a velocidade com que ela passa pelos vazios e consequentemente aumentando o coeficiente de permeabilidade.

Enquanto que a permeabilidade intrínseca é uma função somente do meio e tem dimensões de área, o coeficiente de permeabilidade ou condutividade hidráulica é um coeficiente de proporcionalidade que leva em consideração várias características do meio e dos fluidos que escoam por esse meio, expressa em m/s ou cm/s.

Ao passar pelo solo, o fluxo entra com uma certa carga, que vai diminuindo conforme se move das zonas de maior energia para as de menor energia. Essa energia é controlada pela gravidade (posição do trecho do pacote) e conteúdo em água. O caminho que esse fluxo percorre é representado pelas linhas de fluxo e o potencial de carga equivalente nas diferentes linhas de fluxo configuram as equipotenciais. Conforme as linhas se prolongam na direção de deslocamento as equipotenciais ficam cada vez menores, ou seja, o fluxo vai perdendo a sua energia e ficando mais lento. Esse fluxo só ocorre em solos não saturados quando a umidade limite do solo é alcançada, chamada de saturação residual do solo.

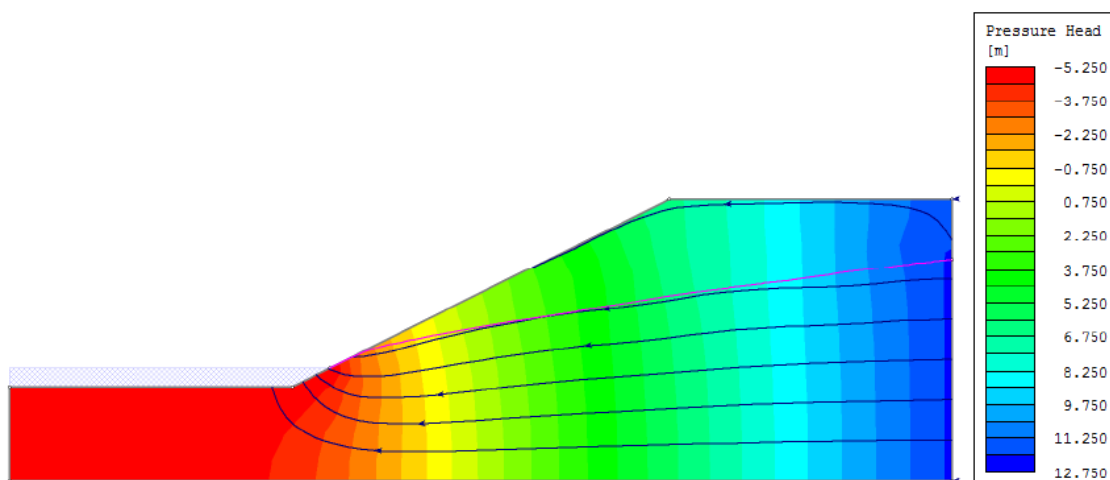


Figura 5 – Exemplo de linhas de fluxo e equipotenciais – Tutorial Slide

Como mostrado no exemplo ilustrado na Figura 5, as linhas pretas sub-horizontais representam as linhas de fluxo com as setas indicando a direção dele e a gradação do azul escuro ao vermelho mostram as diferentes faixas equipotenciais da mais alta carga para a mais baixa. Esse fluxo pode ser permanente ou transiente, que é o caso do fluxo gerado pelo volume pluviométrico, pois a altura de precipitação varia ao longo do tempo.

2.2. DECLIVIDADE E COBERTURA

Quanto maior a declividade do terreno, maior será a velocidade com que a água escoar sobre a superfície. Portanto, bacias hidrográficas que apresentam relevos mais íngremes, tem uma velocidade de escoamento maior do que bacias com relevos mais suaves. O tempo de infiltração da água no solo é inversamente proporcional à velocidade desse escoamento, pois mesmo que o solo ainda possua capacidade de absorver mais água, um fluxo de escoamento com altas taxas de velocidade, devido à terrenos íngremes, escoar mais rápido do que o tempo necessário para o solo atingir a sua capacidade de infiltração.

O tipo de vegetação influencia na permeabilidade do solo, pois, dependendo dela, o volume hídrico que infiltra varia. As propriedades dessa

vegetação, como sua altura e profundidade de raízes podem atenuar o efeito pluviométrico no solo. Para calcular o volume de água que escoar superficialmente, a cobertura vegetal deve ser levada em consideração, pois cada tipo de cobertura possui um coeficiente de escoamento superficial distinto.

2.3. DURAÇÃO E INTENSIDADE

Outra correlação importante desse processo é entre o tempo que essa precipitação ocorre com o volume precipitado. Chuvas com volumes grandes que ocorram em um curto período de tempo ou chuvas de fluxo persistente, por várias horas ou dias, causam alterações no comportamento dessas camadas de subsuperfície. Uma dessas alterações é em relação ao nível freático, que é a linha que indica em qual profundidade se encontra o lençol de água subterrânea.

Esse nível freático muda conforme o volume hídrico que infiltra e a velocidade com que esse nível varia, aliado à velocidade com que esse volume hídrico escoar sub-superficialmente por esse pacote, assim como as propriedades resistivas dos solos que pertencem a ele e as características morfológicas desses terrenos, tem influência no processo erosivo.

Um volume pluviométrico grande ocorrido em curto prazo sobre um dado local pode gerar um fornecimento de água para aquele solo, maior do que a quantidade que ele é capaz de suportar. Esse volume pluviométrico, a velocidade com que ele chega à superfície e a duração que ele ocorre, dependem de vários fatores, como o tipo de chuva, o regime de ventos e a temperatura.

2.4. TIPOS DE CHUVA

As chuvas podem ser frontais (frente quente e frente fria), convectivas ou orográficas. As chuvas frontais têm intensidades médias e longa duração, atuando sobre uma grande área. As convectivas são chuvas de curta duração e

grandes intensidades que ocorrem em um espaço pequeno, muito frequentes em regiões equatoriais. Já as orográficas são chuvas que ocorrem em áreas pequenas, com baixa intensidade pluviométrica, porém de longa duração.

As chuvas orográficas ocorrem quando o ar quente e úmido encontra a barreira do relevo, sendo empurrado para as áreas mais altas, onde o ar esfria, fazendo com que o vapor se transforme em nuvens que provocam chuvas mais frequentes. (FREITAS et al, 2015). Esse tipo de chuva é comum na região da sub-bacia do rio Sana, devido ao comportamento geomorfológico da área.

Todas as propriedades citadas nos itens acima, pertencentes a esse processo, influenciam na capacidade de um terreno se manter estável diante das várias condições pluviométricas que podem ocorrer. Compreender como esses processos interagem entre si, auxilia no entendimento do comportamento geomecânico das áreas onde são realizadas modificações no ambiente, devido à ocupação do homem.

2.5. CLIMA

O clima dessa região é classificado como tropical úmido. (FREITAS et al, 2015). Nesse tipo de clima é comum que a precipitação média anual seja maior do que a ETP potencial anual. Isso significa que o volume de água que chega à superfície é maior do que o volume que evapora e transpira, ou seja, a maior parte da água precipitada interage com os pacotes terrosos, seja sub ou superficialmente.

Nevoeiros durante a tarde são muito comuns no inverno dessa região, nas partes mais altas, e ocorrem chuvas orográficas, favorecendo o aumento dos teores de umidade. O volume pluviométrico e a temperatura variam ao longo do ano, sendo o verão mais chuvoso e o inverno mais seco. Nos meses do meio do ano, a média mensal de chuva fica abaixo dos 60mm. (FREITAS et al, 2015).

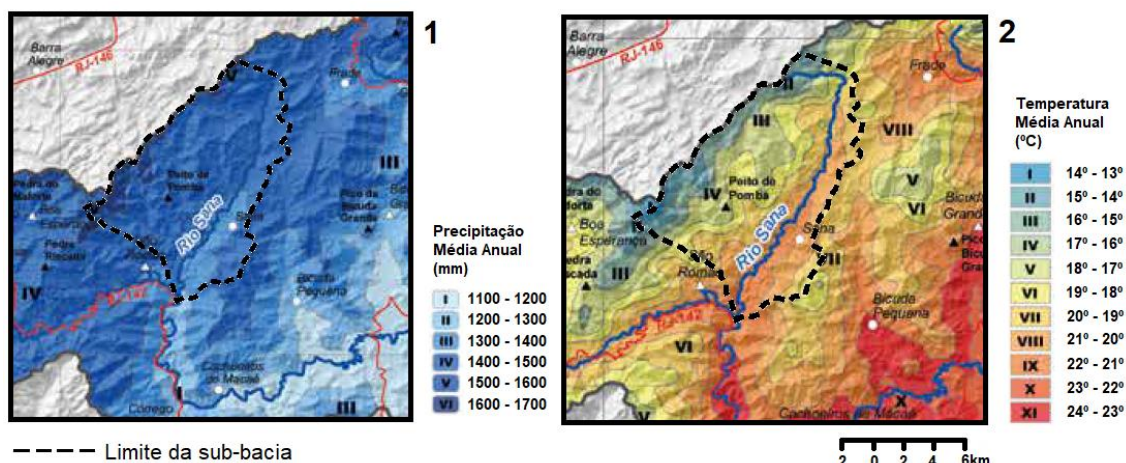


Figura 6– Mapa de precipitação média anual (1) e mapa de temperatura média anual (2) da região da sub-bacia do rio Sana, adaptado de Freitas et al, 2015.

Segundo o mapa apresentado por Freitas et al (2015), a precipitação média anual na bacia do rio sana varia entre 1200 e 1500mm e a temperatura média anual varia entre 17° e 22°. É possível observar que a região apresenta uma gradação de maior a menor temperatura da parte mais alta para a mais baixa da bacia hidrográfica, devido ao padrão do relevo.

Através dos mapas de balanço hídrico mostrados na Figura 7, é possível verificar a diferença entre a quantidade de água que chove e a que evapora, sendo os números positivos indicadores de áreas onde chove mais do que evapora e números negativos o inverso. Quando o volume de água de chuva é maior do que o volume de água que evapora, essa diferença é estocada em subsuperfície.

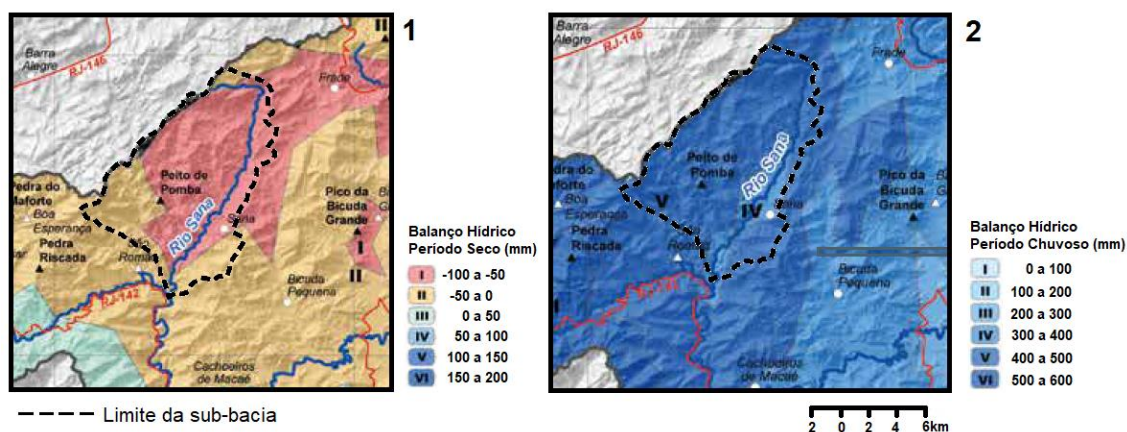


Figura 7– Mapa de balanço hídrico, período seco (1) e período chuvoso (2) da região da sub-bacia do rio Sana, adaptado de Freitas et al, 2015.

É possível observar que no período seco há um déficit hídrico, que é o termo usado para indicar que há mais evaporação do que precipitação. Enquanto que no período chuvoso há um aporte hídrico, onde a diferença entre a água que precipita e a que evapora pode chegar a 500mm nessa região. Esse período é o mais propenso para uma atuação mais marcante dos processos descritos nos itens anteriores desse capítulo.

3. AQUISIÇÃO DE DADOS

Para a realização desse estudo foram coletados dados no banco de dados do INEA, que reúne informações do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística – IBGE, do Serviço Geológico do Brasil / Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais – SGB / CPRM, da ANA e outras, pois são bases integradas. Foram coletados também dados pluviométricos na base de dados da ANA.

Todas essas informações, assim como os resultados obtidos em estudo prévio realizado por Moreira (2017), que serviram de subsídio para essa pesquisa, foram reunidas e analisadas em *softwares* de análise estatística e geoespacial, resultando em mapas, figuras, gráficos e tabelas que foram analisados em conjunto com a bibliografia para a discussão dos resultados.

3.1. BANCO DE DADOS DO INEA

Foram coletados, desse banco, três conjuntos distintos de dados estruturados em sistema de informações geográficas – SIG:

- O mapeamento geológico do Estado do Rio de Janeiro, realizado pelo SGB / CPRM em escala 1:400.000;
- O conjunto de dados do projeto RJ25, que foi realizado através de uma parceria entre o IBGE e o Governo do Estado do Rio de Janeiro, através da Secretaria de Estado do Ambiente – SEA, onde o objetivo era criar uma base cartográfica contínua vetorial, através de interpretação de fotografias aéreas e mapeamento de campo em escala 1:25.000, que gerou mais de 1500 pontos de controle em todo o Estado;
- O mapeamento das feições erosivas do Estado do Rio de Janeiro, realizado pela CPRM, onde são apresentadas várias características importantes para o entendimento do comportamento erosivo da área estudada, como a susceptibilidade erosiva, padrões de relevo, tipos de solos, dentre outras,

realizado através de interpretação visual em mosaicos de ortofotos de alta resolução e verificação posterior em campo em escala 1:25.000.

Para aquisição desses dados foi acessado o portal GeoINEA, que apresenta seus dados estruturados em diferentes grupos, onde existe a opção de visualizá-los em ambiente SIG online ou baixá-los em forma de metadados. A navegação no portal é bem simples e os dados são apresentados de forma bastante intuitiva. Para coletar os dados de interesse para esse estudo, foram acessados os menus de monitoramento & uso de solo e projetos & parceiros.

3.2. BANCO DE DADOS DA ANA

A Agência Nacional de Águas – ANA conta com um rico banco de dados (HidroWeb) disponibilizado em seu site, de acesso livre. É possível adquirir dados pluviométricos e fluviométricos de várias estações, operadas por companhias diversas, espalhadas em todo o Brasil, bem como metadados e *shapefiles* sobre as estações.

Assim como os dados do INEA, esse banco de dados é muito robusto. Para filtrar as informações a serem coletadas, primeiro foi feita uma análise no *shapefile* da ANA, com a localização das estações, junto com o limite da bacia do rio Sana. Foram verificadas todas as estações localizadas num raio de 30km da borda da bacia. Das 69 estações contidas nessa região, apenas 15 continham dados disponíveis para *download*, todas operadas pela CPRM, com exceção da estação Nova Friburgo que é operada pelo INMET.

Dessas estações disponíveis, foram selecionadas 8 estações que apresentavam uma melhor localização para compor o banco de dados pluviométricos, compreendendo as estações Barra Alegre, Fazenda Oratório, Galdinópolis, Maria Mendonça, Piller, Quartéis, Rio Dourado e Vargem Alta, todas operadas pela CPRM. As duas estações mais próximas da bacia são Maria Mendonça e Barra Alegre, num raio de até 10km da borda da bacia. As demais

estações estão localizadas num raio de até 20km. Esses dados foram coletados em formato CSV e organizados para análise estatística posterior.

3.3. PARÂMETROS LABORATORIAIS

Moreira (2017) caracterizou as propriedades físicas, mineralógicas, geotécnicas e morfológicas de um perfil de solo de um talude de corte localizado na bacia do rio Sana – que apresenta uma boa representatividade das características diagnósticas daquela área – de modo a avaliar a sua erodibilidade, através de uma série de ensaios de laboratório. Dentre os ensaios realizados, está o ensaio de cisalhamento direto, que tem como objetivo determinar a capacidade que um solo possui de resistir a uma tensão máxima cisalhante mantendo a sua estabilidade. Quando essa resistência é excedida o solo se rompe. Através desse ensaio é possível conhecer a coesão e o ângulo de atrito do solo ensaiado, que são os parâmetros de resistência ao cisalhamento no critério de Mohr-Coulomb, comumente utilizado para descrever a resistência dos solos. Além dos resultados obtidos nesse ensaio, outras caracterizações dos pacotes terrosos, assim como a geometria do talude, estudados pelo autor, serviram de *input* para a presente análise.

Dentre os ensaios e caracterizações dos pacotes terrosos que compõem o talude estudado, realizado por Moreira (2017), foram usadas nesse estudo as seguintes informações:

- Informações sobre a geometria do talude, espessura das camadas e informações sobre a profundidade de coleta dos materiais para compor a seção a ser analisada na estabilidade;
- Informações sobre as feições erosivas evidenciadas em trabalho de campo para correlação com os mapas fisiográficos elaborados;
- Resultados do ensaio de cisalhamento direto para as condições natural e inundada da amostra.;
- Outros resultados: peso específico, granulometria, índice de vazios, umidade, massa específica, porosidade e grau de saturação.

4. TRATAMENTO DE DADOS

4.1. DADOS PLUVIOMÉTRICOS

Antes da análise estatística dos dados pluviométricos, foi realizado um procedimento de *data cleaning*, que consiste em organizar e padronizar as variáveis, detectar inconsistências, corrigir ou eliminar os registros imprecisos e organizar os dados adquiridos em formato tabular. Para realizar esse procedimento, assim como a análise estatística, foi utilizado o programa Stata que é um *software* estatístico para ciência de dados.

Os dados de cada estação no formato CSV foram importados para o programa, salvos em formato DTA e as variáveis foram categorizadas conforme as legendas contidas nos arquivos adquiridos. Os dados disponíveis nessa base consistiam em tipo de medição: via pluviômetro, pluviógrafo ou data logger; nível de consistência dos dados: brutos ou consistidos; total precipitado por dia em cada mês; totalizadores com número de dias chovidos no mês, dia do mês que ocorreu a precipitação máxima, o total precipitado no mês e o total anual; e status dessas variáveis: real, estimado, duvidoso ou acumulado. Os 9210 registros disponíveis são de 1950 até 2018, porém somente duas estações – Galdino e Piller, obtêm dados de 1950 até 1967. De modo a utilizar registros mais completos para todas as estações, foi decidido trabalhar com os dados de 1968 a 2017, completando um total de 50 anos de registros.

Essa medida é importante, pois, como a base fundamental da construção do modelo pluviométrico apresentado nesse estudo é a partir da comparação de valores médios de precipitação anual entre as estações, lacunas nos registros mensais poderiam causar distorções no dado final. Através de dados completos, para todos os anos em todas as estações, é possível obter um resultado final mais fidedigno.

Quanto ao status das precipitações medidas diariamente, foi verificado que os valores estimados, duvidosos ou acumulados somavam menos de 1% do total, em todas as estações. Esses dados não foram excluídos da base, de forma

a ter o registro mais completo possível para a análise, visto que a baixíssima distribuição de valores com esses status não causaria um impacto na análise.

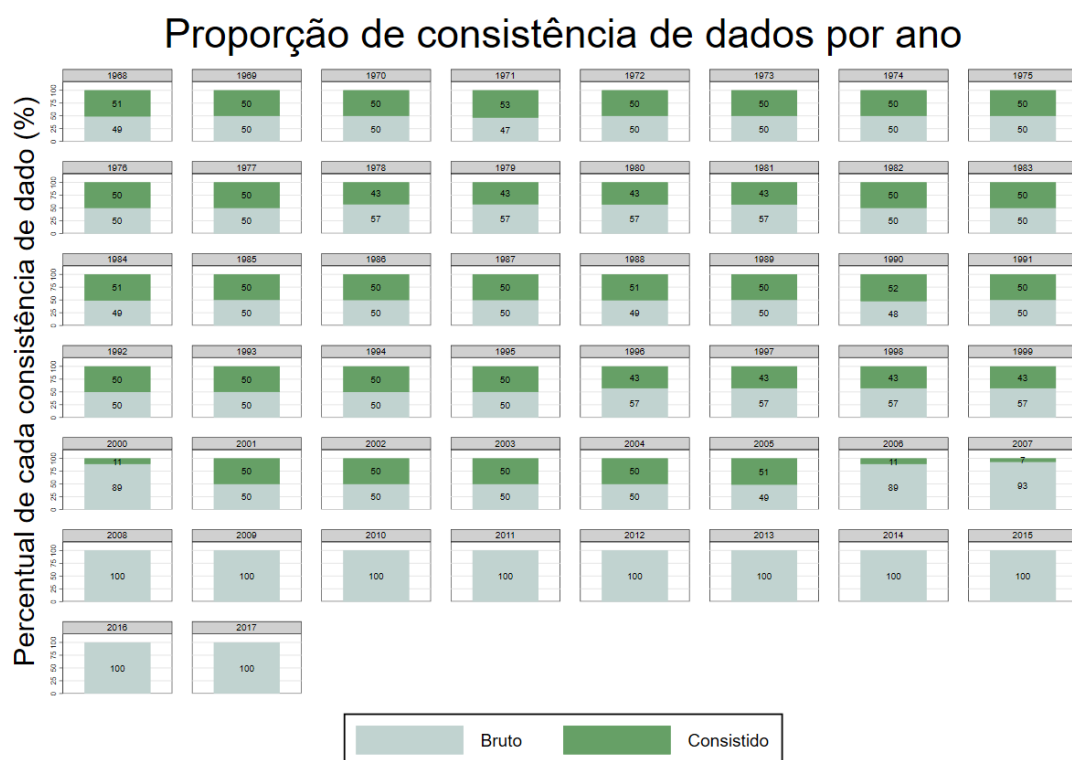


Figura 8 – Gráfico com a proporção de consistência de dados pluviométricos, por ano, no período de 1968 a 2017. Construído através do *software* Stata, a partir dos dados pluviométricos do banco de dados da ANA.

Outro filtro realizado nos dados foi quanto à sua consistência, onde o dado é categorizado como bruto ou consistido. Como mostra a Figura 8, a maioria dos registros anuais contém dados tanto brutos quanto consistidos, porém alguns anos tem em sua maioria ou em sua totalidade apenas dados brutos disponíveis, principalmente de 2006 em diante. Os dados brutos são os dados obtidos na coleta, enquanto que os consistidos são dados que passaram por algum tipo de revisão posterior. Esse procedimento é realizado para minimizar os erros no banco de dados.

De forma a manter apenas um registro mensal para realizar os cálculos estatísticos, esses dados foram filtrados dando preferência aos registros consistidos para os anos em que havia disponibilidade tanto dos consistidos quanto dos brutos, e utilizados os dados brutos para os anos em que não havia disponibilidade dos consistidos.

Outra inconsistência evidenciada no banco foi a divergência entre os totalizadores e os dados diários. Por conta disso, só foram consideradas as informações dos dados diários e foi realizado um novo cálculo dessas variáveis de totais, exceto em casos de valor estimado para dados do tipo consistido, ou seja, que passaram por uma revisão.

Após o tratamento de dados, a base final passou a conter 4800 registros – todos coletados via pluviômetro – de 50 anos completos com informação de precipitação diária, precipitação total mensal e anual, precipitação máxima no mês e número total de dias chovidos no mês. No que tange à consistência dos dados, 70% deles é do tipo consistido, e devido às baixas taxas de inconsistências identificadas durante o processo de tratamento, esses dados foram considerados confiáveis para realizar os cálculos necessários.

Para realizar esses cálculos, foi programado um código estatístico no programa Stata de modo a obter as seguintes variáveis:

- Média da precipitação total anual dos 50 anos, por estação;
- Média da precipitação máxima anual dos 50 anos, por estação;
- Soma e média de dias chovidos nos 50 anos, por estação.

Os resultados obtidos das médias dos 50 anos de cada estação foram exportados em formato CSV e inseridos no programa ArcGis para a construção do mapa de isoietas pluviométricas da bacia. Através desse mapa foi possível verificar a precipitação média no talude e esse valor foi comparado com as médias de cada estação de modo a selecionar qual estação serviria de subsídio para a próxima etapa.

Essa metodologia foi adotada devido à necessidade de se trabalhar com dados diários para realizar as análises de estabilidade que levam em consideração o fluxo pluviométrico no talude. Como não se tem estação pluviométrica dentro da bacia com dados disponíveis, foi necessário fazer essa correlação através do método de isoietas, que é um dos métodos mais precisos para se prever a distribuição pluviométrica de uma região.

Com a estação escolhida, foram elaborados gráficos através do *software* Excel de forma a observar mais detalhadamente os dados dessa estação, seguindo essas etapas:

- Gráfico da precipitação média anual para todos os anos de 1968 a 2017;
- Identificação do ano com a maior precipitação média anual;
- Gráfico da precipitação média mensal para esse ano;
- Identificação do mês com a maior precipitação média;
- Gráfico com a precipitação total diária desse mês.

A escolha da estação que mais se assemelha em precipitação média com o resultado obtido para o talude através do mapa de isoietas, tem como intuito selecionar um padrão de chuvas que mais se equipare com a chuva que precipita sobre o talude, estimada através do mapa. Com a escolha da estação que obtém dados semelhantes às condições pluviométricas ocorridas sobre o talude é possível identificar o período que se deseja trabalhar.

De modo a levar a análise de estabilidade à um ponto crítico de ocorrência, foi selecionado o período de maior volume precipitado e analisado em nível diário, como essa precipitação se comportou ao longo do tempo. Todos os resultados obtidos nessa análise estão apresentados no capítulo 8.

4.2. DADOS GEOESPACIAIS

Para filtrar a grande quantidade de dados disponíveis, foi feito um recorte nas informações em ambiente SIG através do programa QGIS, de modo a agilizar a análise de dados. Antes de realizar os ajustes apresentados a seguir, os *shapefiles*, dos diferentes bancos de dados, foram reprojetados para o mesmo sistema de coordenadas: SIRGAS 2000 – UTM Zona 23S – Projetado.

Após essa adequação de coordenadas, foi criado um *shapefile* com a delimitação da bacia do rio Sana, através das curvas de nível, onde foi traçado o limite da bacia percorrendo as linhas de cumeeiras de sua borda. Através desse limite criado, os demais *shapefiles* foram recortados utilizando a ferramenta *Buffer* do menu Vetor / Geoprocessamento, de modo a exibir apenas as informações de interesse a esse estudo.

A decisão de utilizar o *software* QGIS para a primeira fase de tratamento dos dados deu-se pelo fato do programa consumir menos memória para realizar suas tarefas. Como o conjunto de dados brutos era muito denso, esse procedimento estava apresentando lentidão no programa ArcGIS, devido à limitação de *hardware* disponível. O Qgis mostrou-se mais eficaz em operações mais simples de manipulação de vetores, como recortes e *buffer*, agilizando assim o tempo de tratamento de dados.

Todavia, foi necessário utilizar em uma segunda etapa, o ArcGIS, pois, no que tange aos procedimentos analíticos como criação de modelo digital de elevação – MDE e outros procedimentos, o ArGIS ganhou em qualidade.

Após a fase inicial de recorte dos dados a serem utilizados, e criação dos *shapefiles* respectivos, esses resultados foram inseridos no programa ArcGis para a elaboração dos modelos necessários. O primeiro deles foi o modelo digital de elevação – MDE, criado com a ferramenta *Topo to Raster*, do menu *3D Analyst Tools*. Através desse MDE em conjunto com os dados adquiridos, foram gerados vários *shapefiles* para a análise, como o mapa de declividade e outros, utilizando as ferramentas do menu *Spatial Analyst Tools*, apresentados nos capítulos 6 e 7.

Para criar um efeito 3D à visualização dos mapas, foram gerados dois *hillshades* com azimuth/altitude diferentes, através da ferramenta *Hillshade* do menu *Spatial Analyst Tools*. Um com 45/45 e outro com 180/45, que foram os parâmetros que combinados geraram uma melhor visualização das feições geomorfológicas.

Os dados de precipitação média dos 50 anos das 8 estações pluviométricas utilizadas no estudo, foram importados para o ArcGIS e através da ferramenta IDW do menu *Spatial Analyst Tools*, foi gerado o mapa de isoietas da região, apresentado no capítulo 8.

4.3. DADOS GEOTÉCNICOS

A seção esquemática apresentada na Figura 9, mostra a distribuição dos horizontes que compõem o talude estudado. Moreira (2017) descreveu esse talude como tendo horizonte A com 10cm de espessura, horizonte B variando de 1,5m a 2,5m de espessura e o horizonte C variando de 2,0m a 3,0m de espessura, com uma altura total variando entre 3,5m a 5,5m. Porém, no item em que o autor especifica a profundidade em que as amostras foram coletadas, ele afirma ter coletado amostras dos horizontes B amarelo a C vermelho, respectivamente, nas profundidades: 1,4m, 2,8m, 3,3m e 3,9m.

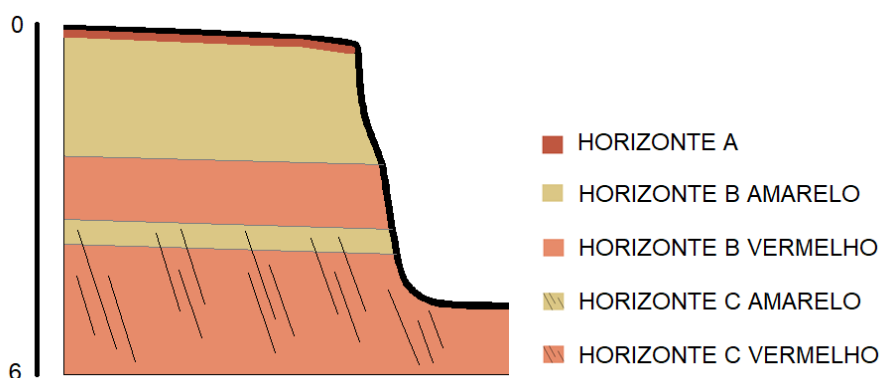


Figura 9 – Seção esquemática do talude. Construído através do *software* AutoCAD, a partir dos dados de Moreira (2017).

Como pode ser observado, a profundidade em que foi realizada a coleta da amostra do horizonte B vermelho ultrapassa o limite da espessura especificada anteriormente. Por conta disso, e levando em consideração que seções mais altas de talude tendem a apresentar mais problemas de estabilidade, foram realizados ajustes nesses limites de camadas para a construção da seção final a ser realizada.

A configuração final adotada para as espessuras das camadas dos horizontes B amarelo ao C vermelho, respectivamente, foram as seguintes espessuras: 2m, 1m, 0,5m e 2,5m com uma altura total do talude em 6m.

Esse perfil de solo é proveniente do granito Sana e suas características são melhor descritas no capítulo 6, que fala sobre a geologia da área. As linhas ilustradas na Figura 9, no horizonte C são para diferenciar essas camadas do horizonte B e por se tratar de um solo saprolítico, evidenciar a presença de estruturas reliquias, porém o detalhamento dessas estruturas não foi realizado, pois além do enfoque desse trabalho ter um caráter mais geotécnico, por tanto foi dado mais evidência aos objetivos centrais, não foi realizado trabalho de campo para entrar nesse nível de detalhe.

Outro ajuste realizado foi em relação a geometria da face do talude. Moreira (2017) especifica que o talude tem um corte de inclinação em 80°, porém ao observar imagens do talude, verificou-se que as camadas do horizonte B apresentam uma leve curvatura da linha que separa os horizontes até o topo do talude. Essa feição foi evidenciada em seção, de forma a obter uma análise mais próxima da configuração real.

Após a definição da seção, foram criados os arquivos DXF necessários para importação no programa Slide, onde foram gerados os modelos de análise conforme especificado no capítulo 5.

Segundo Moreira (2017) em todos os horizontes os solos apresentam mais de 50% de areia total, predominando o intervalo fina a média e uma maior quantidade da fração argila nos horizontes pedológicos (B). Os horizontes foram classificados como areia siltosa.

5. FUNDAMENTOS, MATERIAIS E MÉTODOS DA ANÁLISE

A análise de estabilidade consiste num conjunto de procedimentos que determinam quanto uma encosta ou talude estão próximos de romper, mediante à atuação de vários condicionantes. (FILHO e VIRGILI, 1998). Existem três abordagens no estudo de estabilidade de taludes:

- Métodos analíticos;
- Métodos experimentais;
- Métodos observacionais.

Esse estudo utiliza o método analítico, que envolve análises baseadas tanto na teoria do equilíbrio-limite quanto nos modelos matemáticos de tensão e deformação. Esse método expressa a estabilidade de uma encosta ou talude, através de um coeficiente chamado de fator de segurança – FS. Quanto maior for o valor do FS, mais estável será o talude, diante das condições formuladas na análise. Quando esse FS tem valor igual a 1 significa que esse talude ou encosta encontra-se no limite de ruptura. Valores de FS menores que 1 indicam instabilidade. Esse coeficiente é calculado pela razão entre resistência do terreno ao cisalhamento e a tensão cisalhante atuante. (FILHO e VIRGILI, 1998).

Nos modelos matemáticos de tensão e deformação é determinada a distribuição de tensões do talude ou da encosta, onde é estabelecida a forma do volume sujeito ao deslizamento. Para essa análise é necessário ter conhecimento das resistências ao cisalhamento de pico e residuais e do estado de tensões iniciais do maciço. (FILHO e VIRGILI, 1998). Esse tipo de análise é mais rebuscada e envolve o conhecimento de vários fatores, bem como cálculos computacionais mais complexos.

Por conta disso, as análises de estabilidade através da teoria de equilíbrio-limite são predominantemente mais comuns nos meios acadêmico e profissional, pois exigem menos informações e tem um nível de complexidade bem menor, atingindo ainda assim, satisfatoriamente, o objetivo.

5.1. MÉTODO DE ANÁLISE SELECIONADO

Existem três tipos de ruptura por corte: as em cunha, as circulares e as planares, sendo que as em cunha são associadas às rochas e as demais aos solos. As rupturas ocorridas podem ainda ser mais complexas, quando há uma combinação desses tipos. (FERNANDES, 2014). Solos e rochas altamente intemperizados geralmente formam superfícies de deslizamento circulares. (WYLLIE & MAH, 2005).

Dentre os métodos de análise de estabilidade através da teoria de equilíbrio-limite disponíveis, existem dois grupos: os capazes de analisar todas as possíveis rupturas e os capazes de analisar apenas as circulares. Para realizar essa análise, todos esses métodos começam seguindo a mesma metodologia. O volume pertencente à possível superfície de ruptura é dividido em várias fatias verticais e a interação entre as forças atuantes entre elas é analisada, gerando um FS médio para todas as interações ocorridas naquela superfície.

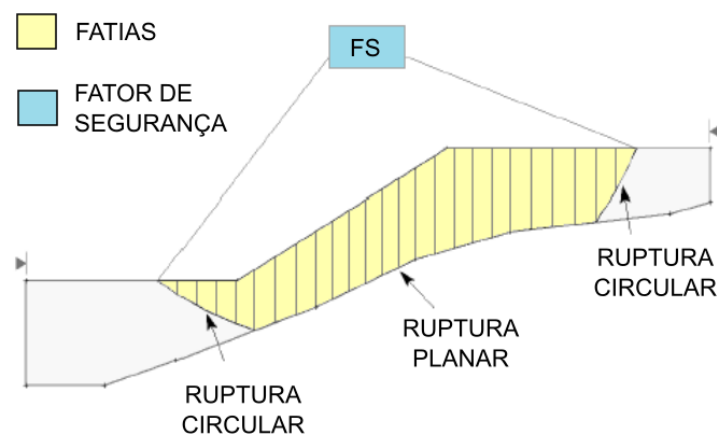


Figura 10 – Exemplo de superfície de ruptura combinada, mostrando a divisão em fatias e apresentação modelo de resultado do fator de segurança. – Adaptado de Tutorial 4 do *software* Slide.

Quando esse procedimento é realizado com a ajuda de um *software* como o Slide, utilizado nesse estudo, o que ocorre é a repetição desse procedimento por um grande número de vezes, onde as coordenadas do centro e o raio do círculo são variados, de modo a encontrar a superfície com o menor FS. (WYLLIE & MAH, 2005).

Esse procedimento pode ser realizado por vários métodos, sendo que cada um deles possui suas particularidades e aplicabilidades. Resumidamente falando, os métodos que só consideram superfícies circulares de rupturas são: o método de Bishop (1955) e o método de Fellenius (1936). Outros métodos como Janbu (1954), Spencer (1967) e Morgenstern-Price (1965) consideram qualquer superfície de ruptura, tendo cada um deles suas particularidades. Essas especificidades de cada método não são descritas nesse estudo, por não fazerem parte do escopo principal. Maiores explicações sobre esses métodos podem ser encontradas nos trabalhos de seus respectivos autores ou em outros trabalhos como em Filho e Virgili (1998), Fernandes (2014) e Nogueira (2010).

O método escolhido para ser utilizado nesse estudo foi o método de Spencer (1967), que considera qualquer superfície de ruptura. Esse método é considerado rigoroso e satisfaz todas as condições de equilíbrio estático, com resultados de FS mais realísticos como aponta Fernandes (2014).

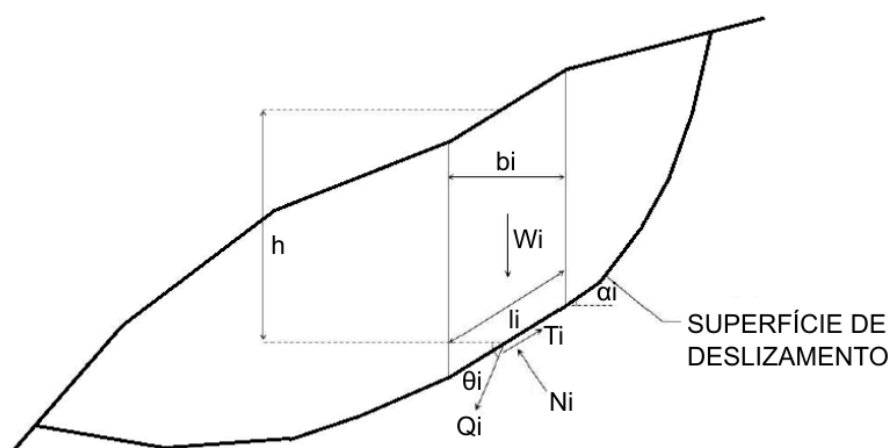


Figura 11 – Esquematização do método de Spencer (1967). – Fernandes (2014).

Para realizar o cálculo do fator de segurança através do método de Spencer (1967) as forças atuantes entre cada fatia (i) da superfície de ruptura analisada é substituída por uma constante Q, com ponto de aplicação no meio da base da fatia, formando um ângulo θ com a horizontal, ilustrados na Figura 11. Ainda são representadas na figura, a força cisalhante (T_i), a força normal (N_i), o ângulo da fatia com a horizontal (α_i), o peso próprio da fatia (W_i) e a altura da fatia (h) considerando a linha vertical central dela do topo da superfície até a sua base. (FERNANDES, 2014).

Além do método principal escolhido, foi acrescentado o método de Bishop-Simplificado, que é um método de análise mais simples, pois não considera todas as interações na superfície analisada, considerando apenas o equilíbrio de forças e momentos entre as fatias, com resultantes das forças verticais entre as fatias sendo nula. (FERNANDES, 2014).

A decisão em mostrar esse outro método nos resultados apresentados surgiu das análises preliminares durante a elaboração do modelo. Verificou-se uma diferença significativa entre as análises realizadas pelo método de Spencer e o método de Bishop-Simplificado, as quais estão ilustradas nos gráficos apresentados no capítulo 9.

Esses métodos foram utilizados nos dois modelos de análise, tanto aquele em que se considera os parâmetros dos ábacos de Hoek & Bray (1981), quanto para o modelo em que se considera o fluxo transiente.

As análises de estabilidade foram geradas com as seguintes configurações: Número de fatias: 30; Tolerância: 0,005; Máximo de interações: 200; Tipo de superfície: Circular; Raio de incremento: 1m. Foram selecionadas ainda as opções *Composite surfaces* e *Create tension crack for reverse curvature*, para refinar o modelo de análise.

De forma a gerar uma apresentação limpa dos resultados, optou-se por apresentar os FS obtidos através do método de Bishop-Simplificado apenas nos gráficos das várias situações para comparação com os valores encontrados através do método de Spencer, devido a esse método não ser o escolhido, servindo apenas de base comparativa.

Os resultados obtidos através do método de Spencer encontram-se ilustrados nos gráficos e nas seções críticas apresentados no capítulo 9. Os resultados de cada seção individual encontram-se nos anexos

5.2. DEFINIÇÃO DAS PROPRIEDADES DA SEÇÃO

Para realizar as análises de estabilidade é necessário especificar as propriedades geotécnicas das camadas que compõem a seção a ser analisada. Para gerar os modelos de análise foram gerados seis arquivos no programa Slide, através das informações da seção desenhada através do programa AutoCAD. Nos cinco arquivos relacionados ao ábaco de Hoek & Bray (1981) foram aplicadas as propriedades de peso específico natural e saturado de cada horizonte e também os resultados dos ensaios de cisalhamento direto, ambos obtidos do estudo de Moreira (2017).

Em relação ao peso específico não foi necessário realizar nenhum ajuste pois o programa Slide aceita a inserção das duas informações, porém quanto aos dados de coesão e ângulo de atrito foi necessário assumir qual dado utilizar, entre os resultados disponíveis para as amostras em condição natural e inundada. Essa escolha foi realizada através da verificação da posição do nível freático em relação ao horizonte, para cada situação do ábaco.

Nos casos em que o horizonte continha mais de 40% da camada sob a influência do nível freático foram assumidos os dados de coesão e ângulo de atrito da amostra em condição inundada e nos casos em que a influência do nível freático era pequena ou nula foram assumidos os dados da amostra em condição natural.

Essa metodologia é válida também para o modelo em que é considerado o fluxo transiente, porém é importante observar que nesse modelo foi adotado como condição inicial a seção de situação do tipo 1 do ábaco de Hoek & Bray (1981), bem como os dados de coesão e ângulo de atrito da amostra inundada, pois o período de chuvas escolhido para ser analisado inicia após seis dias consecutivos sem precipitação, logo foi considerado como condição inicial o

nível freático mais baixo possível e foram considerados os parâmetros da amostra inundada, pois são os que mais se adequam às condições do período analisado.

Os resultados obtidos por Moreira (2017), utilizados na construção dos modelos de análise de estabilidade, estão apresentados nas tabelas a seguir:

Horizonte	γ NAT (kN/m ³)	γ SAT (kN/m ³)	Amostra Natural		Amostra Inundada	
			c (kPa)	ϕ (°)	c (kPa)	ϕ (°)
B amarelo	16,0	18,1	23,6	30,6	16,1	23,8
B vermelho	18,0	19,3	24,3	28,3	16,6	20,5
C amarelo	15,7	18,7	20,8	35,2	8,1	26,8
C vermelho	16,6	18,9	19,0	36,4	7,8	27,0

Tabela 1 – Resultados de ensaio de cisalhamento direto – Moreira (2017).

Horizonte	Massa específica dos sólidos (g/cm ³)	Massa específica aparente natural (g/cm ³)	Umidade natural (%)	Porosidade (%)	Índice de vazios	Grau de Saturação (%)
B amarelo	2,61	1,63	20,69	49,20	0,97	56
B vermelho	2,65	1,83	20,34	43,60	0,77	70
C amarelo	2,60	1,60	10,33	45,40	0,83	32
C vermelho	2,64	1,70	15,62	45,50	0,83	49

Tabela 2 – Resultados da caracterização – Moreira (2017).

Além das camadas dos horizontes apresentadas nas tabelas anteriores, foi criada uma camada inferior para fechamento das condições de contorno e delimitação da área de atuação da seção. Para isso foram considerados valores que se aproximassem de uma camada rochosa, de modo a restringir à análise.

Os dados geotécnicos considerados para essa camada foram: peso específico = 25kN/m^3 , coesão = 200kPa e ângulo de atrito = 50° .

A Figura 12 mostra uma seção típica da geometria analisada sendo do topo para a base apresentados os horizontes B amarelo, B vermelho, C amarelo, C vermelho e Impenetrável – camada criada para fechar as condições de contorno do problema.

O nível freático apresentado – ilustrado pela linha azul – condiz com a situação do tipo 1 do ábaco de Hoek & Bray (1981) e com a condição inicial da análise considerando o fluxo transiente. As linhas formando os retângulos acima da seção pertencem ao grid onde são gerados os centros dos círculos de formação da superfície de ruptura.

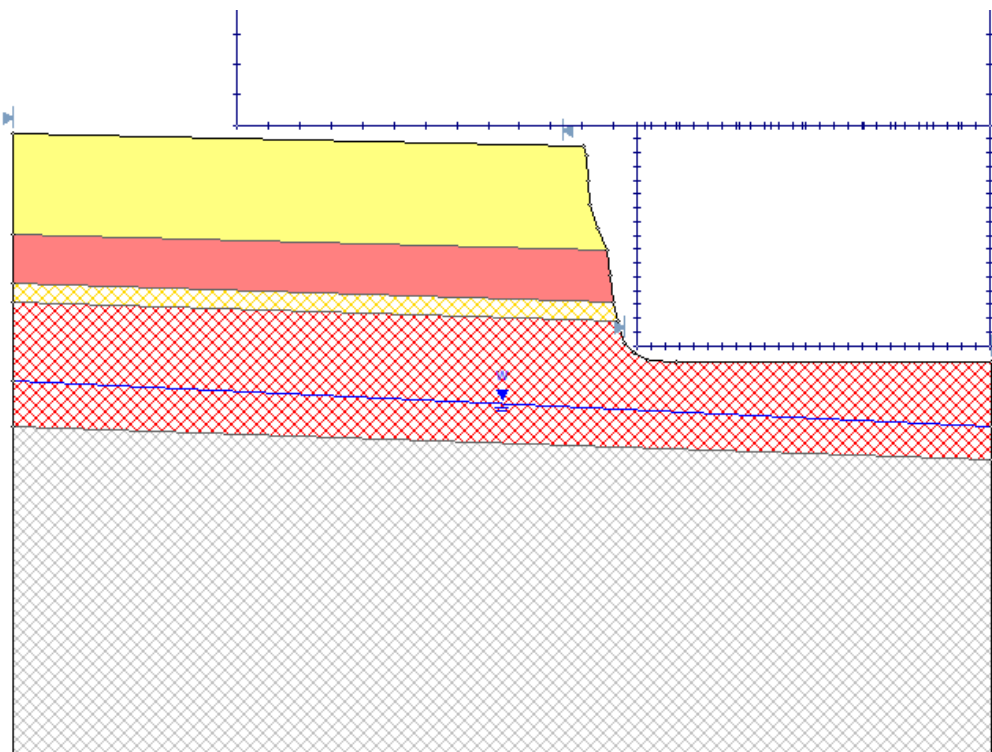


Figura 12 – Seção típica da geometria do talude analisado – Construída através do software Slide.

5.3. A ANÁLISE POR ÁBACO

A análise paramétrica com o auxílio de ábacos é utilizada em conjunto com o método de análise de estabilidade escolhido. Esses ábacos contêm situações modelo e servem como um guia, através da comparação dos parâmetros do ábaco de referência com as condições em campo. Entre os mais utilizados estão os de Taylor, Bishop-Morgenstern e Hoek & Bray. (FILHO e VIRGILI, 1998).

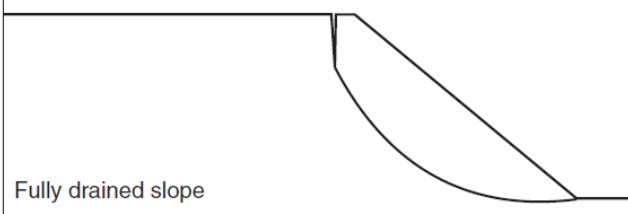
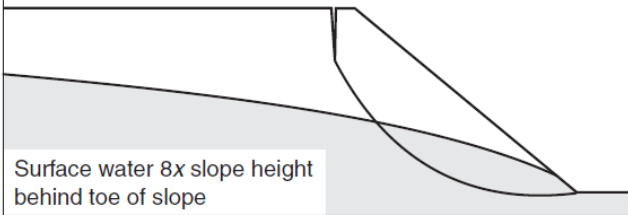
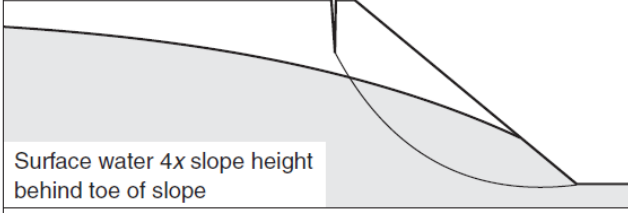
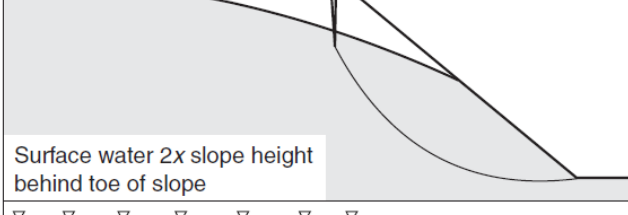
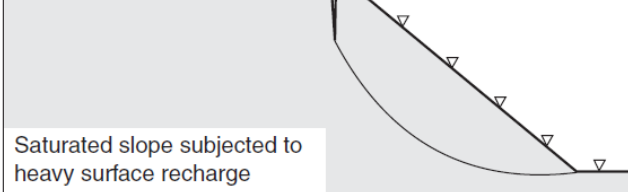
Ground water flow conditions	Chart number
 <p>Fully drained slope</p>	1
 <p>Surface water 8x slope height behind toe of slope</p>	2
 <p>Surface water 4x slope height behind toe of slope</p>	3
 <p>Surface water 2x slope height behind toe of slope</p>	4
 <p>Saturated slope subjected to heavy surface recharge</p>	5

Figura 13 – Ábacos de Hoek & Bray (1981) – Wyllie & Mah (2005).

Uma das formas para estimar as forças da pressão da água em subsuperfície é através do ábaco de Hoek & Bray (1981) que prevê cinco situações diferentes de nível d'água, variando de um talude completamente seco à completamente saturado, como mostra a Figura 13.

Wyllie & Mah (2005) indicam a utilização desses ábacos através da escolha da geometria que mais se assemelha às condições de campo para a realização da análise, porém como essas análises através dos ábacos servirão de parâmetro comparativo com os resultados obtidos através da análise que considera o fluxo transiente, foram realizadas todas as cinco condições apresentadas, e estabelecida uma faixa de variação para esse fator de segurança, apresentada em gráfico no capítulo 9.

5.4. O MÓDULO DE FLUXO TRANSIENTE

Os deslizamentos em solos, frequentemente são ocasionados pelo escoamento subsuperficial dos volumes pluviométricos que infiltram neles. A duração dos eventos de chuva, bem como as propriedades do solo que a recebe, são os grandes protagonistas desse processo. Outros fatores também influenciam no movimento de massas, por isso, tentar elencar os condicionantes exatos é uma tarefa complexa e pode induzir a erros, pois, existem várias incertezas pertinentes a essa problemática e as condições variam muito de cenário para cenário.

Porém, é correto afirmar que, geralmente, a água é um dos, ou talvez o mais importante condicionante no processo erosivo e na formação de suas feições. Por conta disso, estudar o comportamento da água e o que esse comportamento ocasiona na estabilidade, seja de um talude ou de uma encosta, é extremamente relevante, pois é um processo frequente.

Para realizar a análise de estabilidade considerando um fluxo transiente, primeiro é necessário criar o modelo desse fluxo, onde é informado ao programa à malha de elementos finitos a ser utilizada, bem como as propriedades hidráulicas pertinentes a cada camada da seção de análise. Depois são

estabelecidas as condições de contorno do modelo, ou seja, é modelado como o fluxo se comporta em subsuperfície.

Essa modelagem foi realizada através do módulo avançado *Transient Groundwater* do programa Slide, onde é possível programar uma série de eventos consecutivos, bem como a duração deles e as propriedades consideradas para cada estágio, sendo possível programar um fluxo com taxas que variam ao longo do tempo.

As propriedades hidráulicas necessárias para a construção do modelo são: a permeabilidade, a razão entre as permeabilidades vertical e horizontal, o ângulo entre os vetores de permeabilidades vertical e horizontal; a umidade saturada e a umidade residual.

Material	Permeabilidade intrínseca (cm ²)	Condutividade hidráulica (cm/s)
Argila	$10^{-14} - 10^{-11}$	$10^{-9} - 10^{-6}$
Silte; Silte arenoso	$10^{-11} - 10^{-9}$	$10^{-6} - 10^{-4}$
Areia argilosa	$10^{-11} - 10^{-9}$	$10^{-6} - 10^{-4}$
Areia siltosa; Areia fina	$10^{-10} - 10^{-8}$	$10^{-5} - 10^{-3}$
Areia bem distribuída	$10^{-8} - 10^{-6}$	$10^{-3} - 10^{-1}$
Cascalho bem distribuído	$10^{-7} - 10^{-5}$	$10^{-2} - 10^0$

Tabela 3 – Faixa de valores de permeabilidade intrínseca e condutividade hidráulica à água para vários materiais não consolidados – Betim (2013), apud Fetter (2001).

Para a obtenção dos parâmetros de permeabilidade foi utilizada a Tabela 3, que apresenta uma faixa de valores de condutividade hidráulica (permeabilidade) à água. Esses valores, apresentados em cm/s foram convertidos em m/s que é a unidade que foi utilizada no programa Slide.

Foi assumido um valor de 10^{-7} m/s para o horizonte pedológico e 10^{-6} m/s para o horizonte saprolítico. Ambos os horizontes são classificados como areia siltosa, porém o horizonte pedológico apresenta maior teor de argila. Devido a isso foi estabelecido o valor médio da faixa de valores para o horizonte saprolítico e o valor mais baixo para o pedológico.

A razão entre as permeabilidades vertical e horizontal foi considerada igual a 1, pois foi assumido, de forma a simplificar o modelo, que a permeabilidade é igual nas duas direções. O ângulo formado entre as permeabilidades vertical e horizontal foi mantido como zero.

A umidade residual foi estabelecida através dos dados de Carducci et al (2011) apresentados na Tabela 4 e a umidade saturada foi considerada a relação existente entre os índices físicos apresentados na fórmula abaixo, utilizando os dados de Moreira (2017):

$$G \times \omega = S \times e, \text{ onde:}$$

G = Densidade dos sólidos;

ω = Teor de umidade;

S = Saturação;

e = Índice de vazios.

Os parâmetros de umidade residual a serem utilizados foram considerados conforme a correspondência apresentada na Tabela 4, que apresenta os valores referentes aos solos com granulometria semelhante aos solos pertencentes aos horizontes estudados nesse trabalho.

Material	Umidade Residual (%)
Solos com 21% a 25% de teor de Argila	10^{-3}
Solos com teor de 14% de Argila	7^{-3}

Tabela 4 – Parâmetros de umidade residual com relação ao teor de argila – Carducci et al (2011).

Os parâmetros hidráulicos utilizados na construção do modelo de fluxo transiente considerado na análise de estabilidade, estão apresentados na tabela a seguir:

Horizonte	Permeabilidade (m/s)	Umidade Saturada (m^3/m^3)	Umidade Residual (m^3/m^3)
B amarelo	10^{-7}	0,37	0,01
B vermelho	10^{-7}	0,29	0,01
C amarelo	10^{-6}	0,32	0,007
C vermelho	10^{-6}	0,31	0,007

Tabela 5 – Propriedades hidráulicas dos horizontes utilizadas na construção do modelo transiente.

Para a camada inferior criada para o fechamento das condições de contorno foram considerados os seguintes parâmetros: permeabilidade: 10^{-13} m/s, umidade saturada: 0,1 e umidade Residual: 0,0001

Foram estabelecidos quatro conjuntos de fluxo transiente para realizar as análises, considerando 20%, 30% e 40% e 50% de infiltração do total precipitado no dia. Essa medida foi tomada no intuito de estabelecer um panorama de comparação entre os vários volumes possíveis de infiltração, devido às condições de campo.

O volume de água infiltrado, depende de vários fatores como a cobertura vegetal, a declividade e outros, como dito no capítulo 2. Por conta disso, prever o real volume de infiltração é uma tarefa que requer outros recursos. Portanto, optou-se pela análise de volumes de infiltração diferentes para gerar discussão sobre os vários cenários.

Foi considerado como momento inicial, para a análise, o dia 14 de janeiro de 2009 que foi o último dia do período seco e um dia anterior ao primeiro dia do período longo de chuvas estudado. As análises foram realizadas, portanto do dia 14 de janeiro de 2009 ao dia 31 de janeiro de 2009. Dos 17 dias analisados, além da situação inicial em estado seco, apenas 1 dia não ocorreu precipitação, que foi no dia 30 de janeiro.

Foram realizados dois cálculos nos dados de precipitação total diária do período selecionado. O primeiro deles foi para calcular o volume em metros de água infiltrado, considerando as porcentagens 20%, 30%, 40% e 50%. A partir disso foi calculada a taxa de infiltração para cada dia, onde o valor encontrado no primeiro cálculo foi dividido por 86400, para transformar o resultado em m/s.

Esses resultados obtidos foram inseridos no programa Slide e utilizados para a modelagem dos cenários estudados. Como é possível observar na Tabela 6, as taxas de infiltração assumem valores bem baixos.

Dia do mês	Taxa de infiltração com 20% infiltrado (m/s)	Taxa de infiltração com 30% infiltrado (m/s)	Taxa de infiltração com 40% infiltrado (m/s)	Taxa de infiltração com 50% infiltrado (m/s)
Dia 14 (Início)	-	-	-	-
Dia 15	11×10^{-9}	17×10^{-9}	23×10^{-9}	28×10^{-9}
Dia 16	49×10^{-9}	74×10^{-9}	98×10^{-9}	123×10^{-9}
Dia 17	25×10^{-9}	38×10^{-9}	50×10^{-9}	63×10^{-9}
Dia 18	11×10^{-9}	17×10^{-9}	23×10^{-9}	28×10^{-9}
Dia 19	110×10^{-9}	165×10^{-9}	219×10^{-9}	274×10^{-9}
Dia 20	65×10^{-9}	97×10^{-9}	130×10^{-9}	162×10^{-9}
Dia 21	52×10^{-9}	78×10^{-9}	104×10^{-9}	130×10^{-9}
Dia 22	298×10^{-9}	447×10^{-9}	595×10^{-9}	744×10^{-9}
Dia 23	59×10^{-9}	88×10^{-9}	118×10^{-9}	147×10^{-9}
Dia 24	16×10^{-9}	23×10^{-9}	31×10^{-9}	39×10^{-9}
Dia 25	4×10^{-9}	6×10^{-9}	8×10^{-9}	10×10^{-9}
Dia 26	1×10^{-9}	2×10^{-9}	2×10^{-9}	3×10^{-9}
Dia 27	10×10^{-9}	15×10^{-9}	20×10^{-9}	25×10^{-9}
Dia 28	75×10^{-9}	113×10^{-9}	150×10^{-9}	188×10^{-9}
Dia 29	3×10^{-9}	5×10^{-9}	7×10^{-9}	9×10^{-9}
Dia 30	-	-	-	-
Dia 31	94×10^{-9}	142×10^{-9}	189×10^{-9}	236×10^{-9}

Tabela 6 – Taxas de infiltração utilizadas nos modelos de fluxo transiente.

6. GEOLOGIA

Geraldes et al (2012) realizaram um vasto estudo de caracterização geológica no âmbito do Programa de retomada dos Levantamentos Geológicos Básicos (PRONAGEO) em convênio CPRM/UERJ, onde foi utilizado um conjunto de folhas topográficas na escala 1:100.000.

Contando com acentuado apoio de alunos de graduação e pós-graduação da Faculdade de Geologia da UERJ e parceria do Departamento de Recursos Minerais do Estado do Rio de Janeiro (DRM-RJ), a equipe realizou mapas geológicos das folhas utilizadas, bem como texto explicativo.

Uma das folhas utilizadas foi a de Casimiro de Abreu (SF23-Z-B-III) localizada na região noroeste fluminense do Estado entre as latitudes 22°S e 22°30'S, e os meridianos de 42° e 42°30'W, na qual está inserida a área de interesse desse estudo.

Essa região está inserida na Província Mantiqueira que cobre uma área de cerca de 700.000km² afetada litológica e estruturalmente pelo Ciclo Orogênico Brasileiro Neoproterozóico / Cambriano na América do Sul. Ela apresenta unidades geológicas que constituem três domínios crustais de evoluções geológicas diferentes entre si: (a) Terreno Cabo Frio; (b) Terreno Costeiro e (c) Terreno Oriental, sendo todos os terrenos cortados por diques máficos e cobertos localmente por sedimentos Quaternários. (GERALDES et al. 2012).

Analisando a Figura 14, que apresenta as unidades tectônicas do sudeste brasileiro, é possível observar um padrão regional de estruturas e lineamentos com direção predominante N30-60E, coincidindo com a conjugação de dois grandes sistemas de falhas que se interceptam localmente (NE e ENE), sofrendo, próximo à região do granito Sana, ligeira inflexão de ENE para NE. (GERALDES et al. 2012).

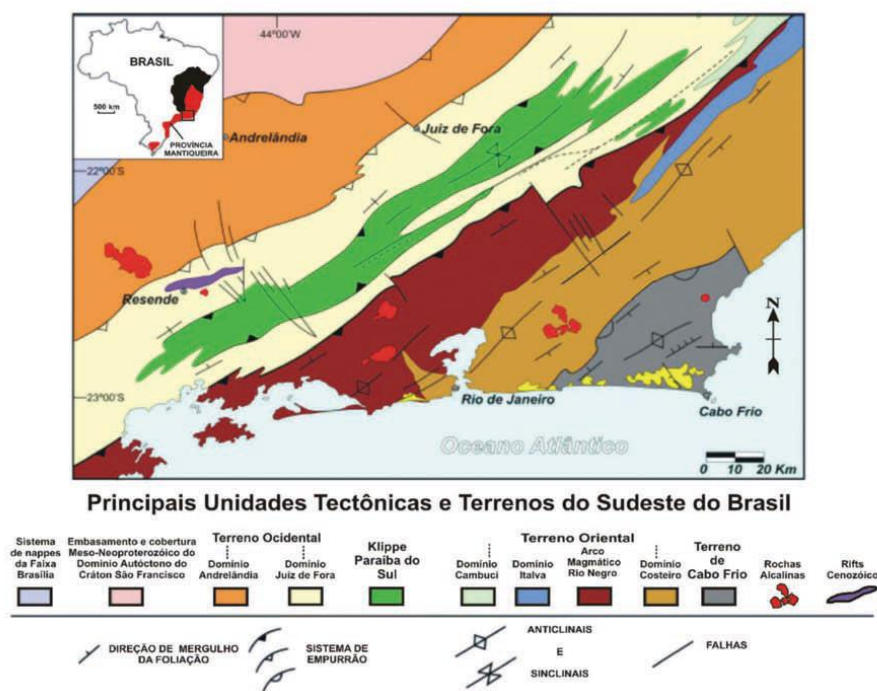


Figura 14 – Distribuição dos domínios crustais do Sudeste Brasileiro, extraído de Geraldles et. al. (2012) apud Heilbron (1994).

Esse controle estrutural é muito evidenciado na sub-bacia do rio Sana, onde a sua robusta rede de drenagem, suas escarpas íngremes, seus vales retilíneos e seus afloramentos intensamente fraturados e falhados encontram-se controlados por falhas geológicas consoantes ao contexto regional. Além disso, essa forte atividade tectônica, tem papel importante no processo erosivo, visto que as direções estruturais regionais se mostram congruentes com as direções de sulcos, ravinas e voçorocas encontradas na área. (GERALDES et al. 2012).

Em análise estatística dos lineamentos tectônicos presentes na área, realizado por Geraldles et. al. (2012) foi quantificado que mais de 1/3 dessa região (42%) apresenta direção morfoestrutural preferencial NW-SE, seguido da direção ENE-WSW com 21%, NE-SW com 20% e por último N-S com 17%.

A sub-bacia do rio Sana faz parte do Terreno Costeiro, que compreende as unidades São Fidélis, São Sebastião do Alto, Trajano de Moraes, Rio Negro, Serra dos Órgãos, Cordeiro e Sana, sendo que a sub-bacia do rio Sana especificamente, é composta principalmente pelo granito Sana entremeado pela

unidade litoestratigráfica São Fidélis, recobertos, nos fundos dos vales e em regiões planas, por sedimentos inconsolidados, como mostra a Figura 15.

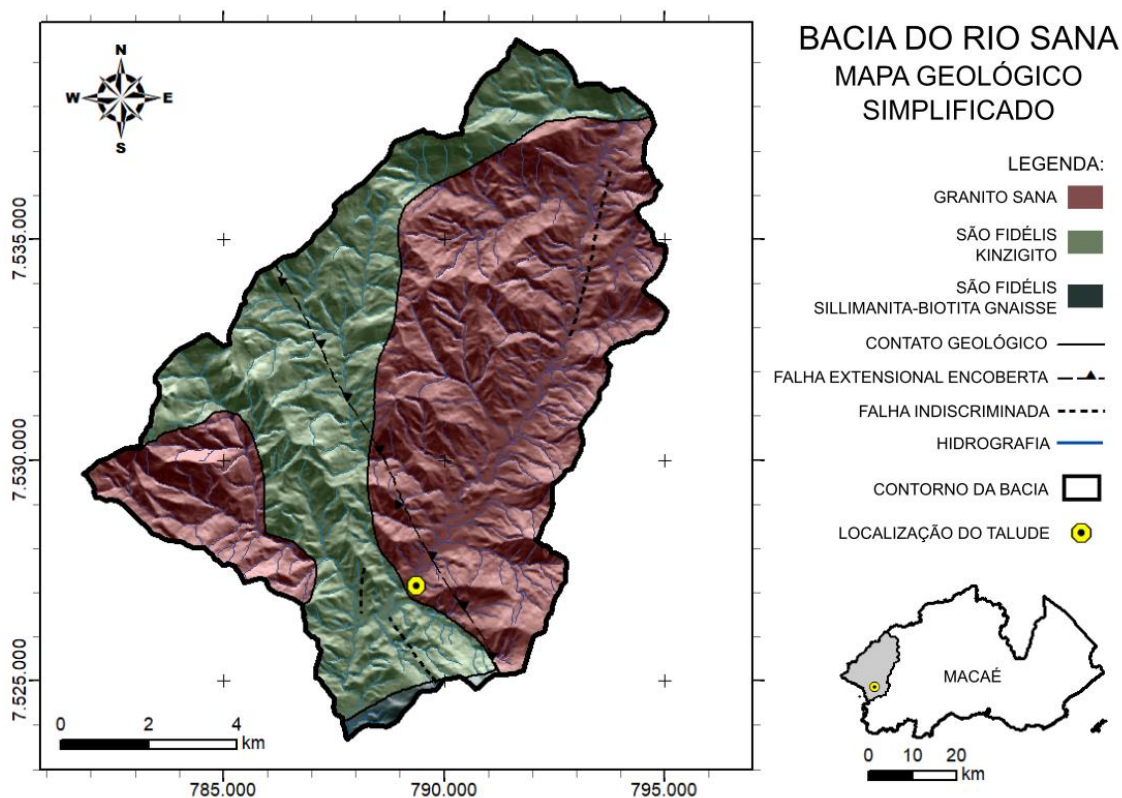


Figura 15 – Mapa geológico simplificado da bacia do rio Sana, em escala 1:100.000 – Imagem construída a partir de *shapefiles* do banco de dados do INEA, utilizando o *software* ArcGIS, sendo o *shapefile* de geologia em escala 1:400.000 e o de hidrologia em 1:25.000, Datum SIRGAS 2000.

O complexo São Fidélis é representado por metassedimentos, formado predominantemente por gnaisses bandados finos, biotíticos, de tonalidade cinza-claro e migmatitos de estrutura dobrada e também migmatitos homogêneos. Já o granito Sana é um monzo a sienogranito leucocrático, cinza claro esbranquiçado a branco, maciço com textura microfanerítica. (GERALDES et al. 2012). Em análise química realizada, Gerald et. al. (2012) mostraram ainda, que o granito Sana apresenta um caráter ligeiramente peraluminoso e apresenta similaridade com granitos gerados em ambiente de arco magmático que apresentam forte fracionamento.

7. ASPECTOS FISIAGRÁFICOS

Como mostrado nos mapas apresentados a seguir, essa área apresenta grande potencial erosivo, devido às suas características.

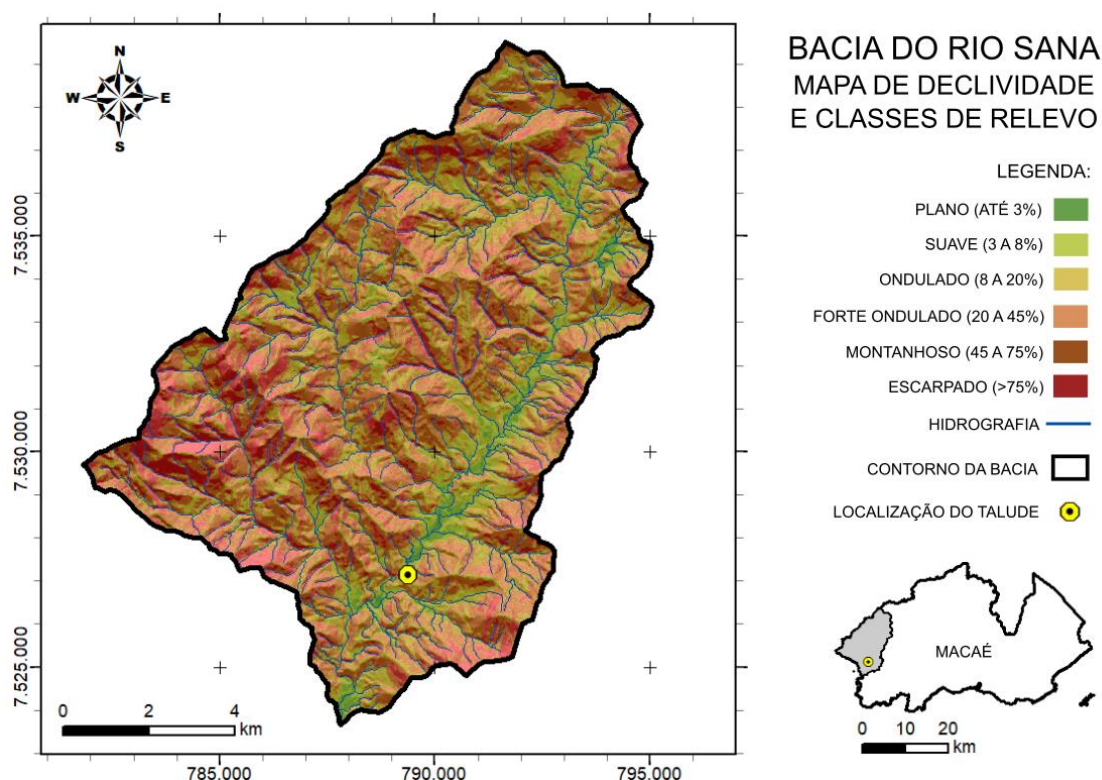


Figura 16 – Mapa de declividade e classes de relevo da bacia do rio Sana, em escala 1:100.000 – Imagem construída a partir de *shapefiles* do banco de dados do INEA, utilizando o *software* ArcGIS, com *shapefiles* em escala 1:25.000, Datum SIRGAS 2000.

Uma expressiva quantidade da área da bacia é representada por relevos escarpados e montanhosos com inclinações que ultrapassam 45%. Esse relevo vai gradando dos pontos mais altos até o vale onde se encaixa o rio Sana em um relevo plano a suave.

Esse tipo de relevo escarpado e montanhoso é muito susceptível aos processos erosivos e à ocorrência de movimentos de massa. Comparando a Figura 16 e a Figura 17 é possível observar que as áreas mais íngremes são classificadas como áreas mais susceptíveis à ocorrência de deslizamentos.

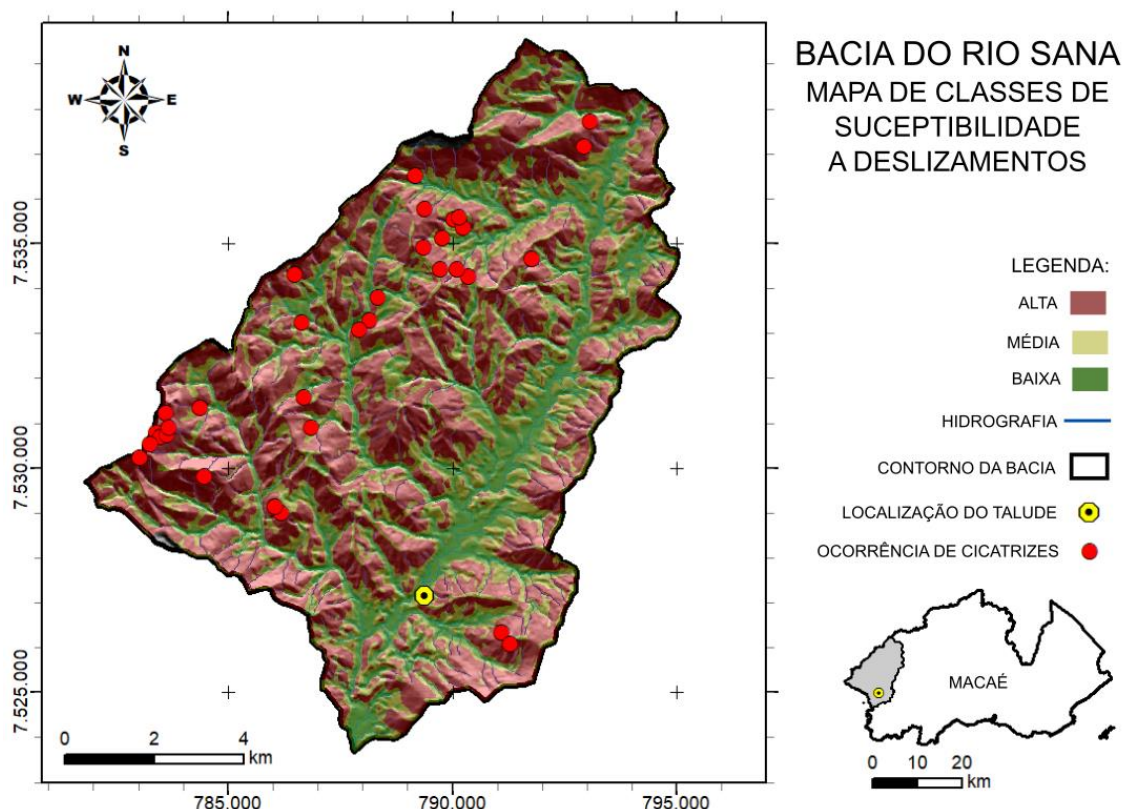


Figura 17 – Mapa de classes de susceptibilidade a deslizamentos da bacia do rio Sana, em escala 1:100.000 – Imagem construída a partir de *shapefiles* do banco de dados do INEA, utilizando o *software* ArcGIS, com *shapefiles* em escala 1:25.000, Datum SIRGAS 2000.

Nas observações de campo realizadas por Moreira (2017), em 39 pontos, foi observado que 50% do total eram feições erosivas do tipo terracete, 19% do tipo sulcos, 13% ravinas, 12% do tipo voçorocas e 6% do tipo laminar.

Comparando os pontos de ocorrência de cicatrizes com o mapa de cobertura vegetal apresentado na Figura 18, é possível observar que a maior concentração de cicatrizes ocorre na área mais florestada da bacia. Apesar da

cobertura vegetal ser um fator positivo na estabilidade de terrenos, nem sempre isso favorece à conservação dos solos. Essa área da bacia, apresenta além das altas taxas de declividade como visto na Figura 16, uma menor temperatura ambiente como citado no item 2.5, onde foram evidenciadas as características do clima nessa região.

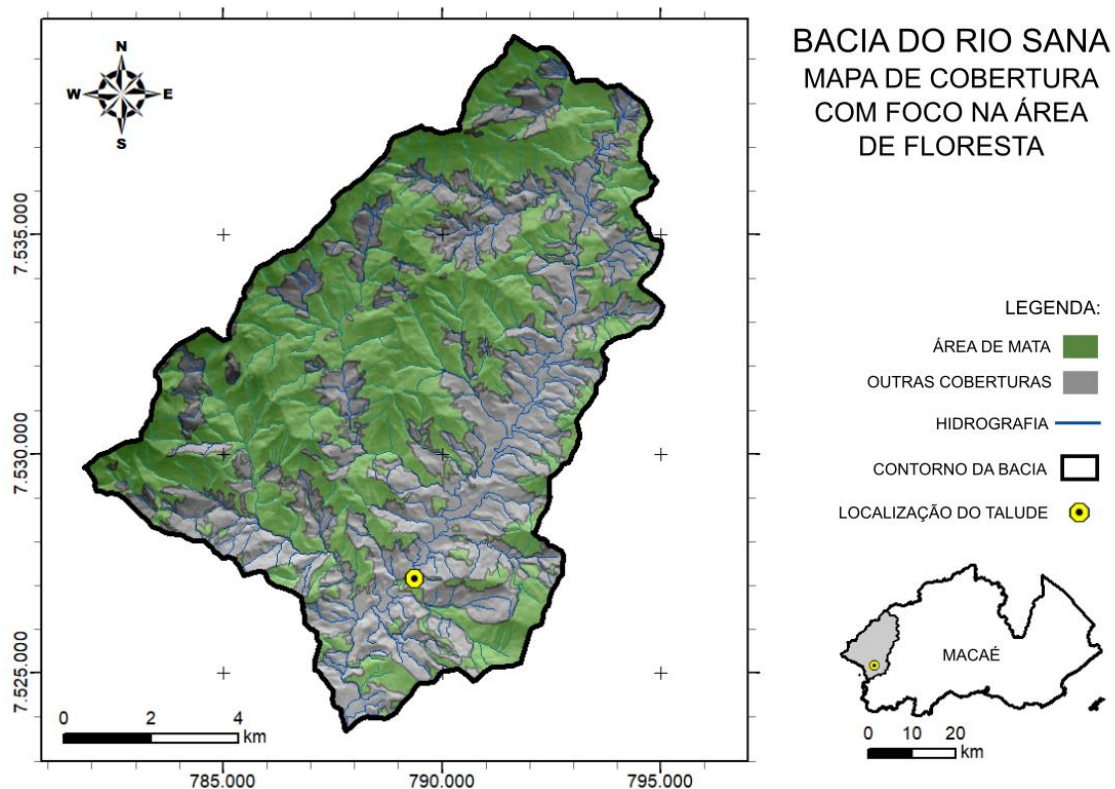


Figura 18 – Mapa de cobertura com foco na área de floresta da bacia do rio Sana, em escala 1:100.000 – Imagem construída a partir de *shapefiles* do banco de dados do INEA, utilizando o *software* ArcGIS, com *shapefiles* em escala 1:25.000, Datum SIRGAS 2000.

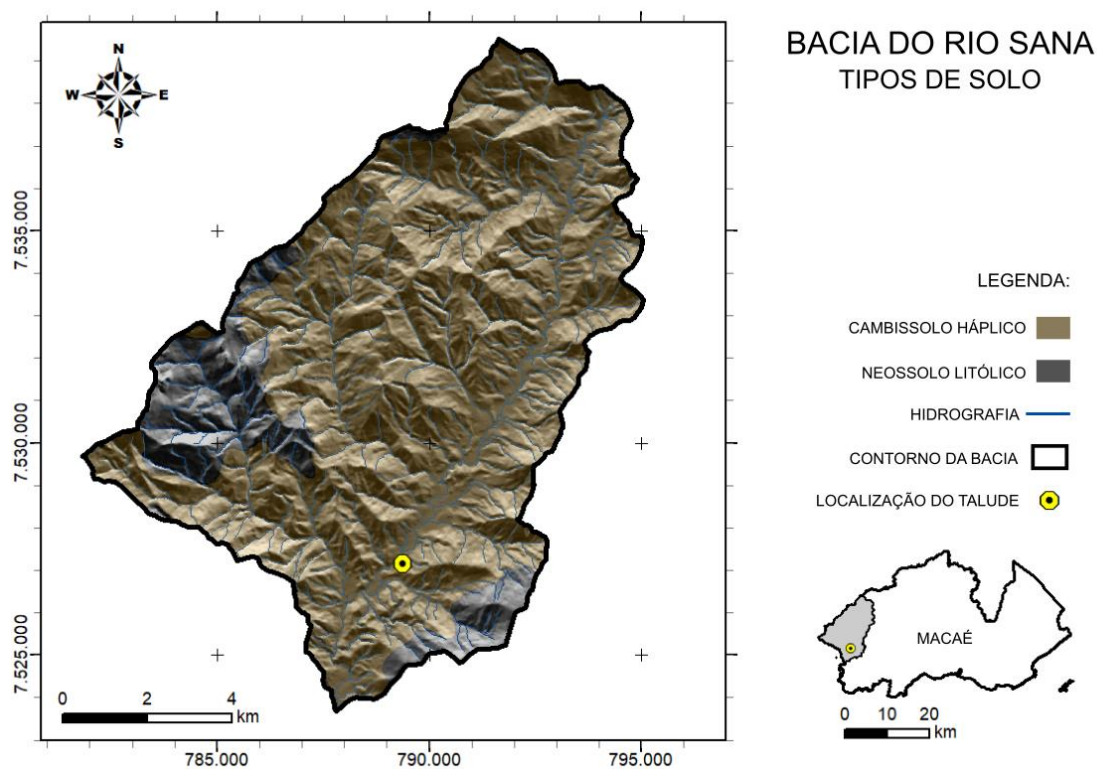


Figura 19 – Mapa de tipos de solo da bacia do rio Sana, em escala 1:100.000 – Imagem construída a partir de *shapefiles* do banco de dados do INEA, utilizando o *software* ArcGIS, com *shapefiles* em escala 1:25.000, Datum SIRGAS 2000.

O ponto de estudo está compreendido na área mapeada como cambissolo, que segundo IBGE (2007), ocorre disseminado em todo o Brasil, e são muito frequentes em regiões serranas e montanhosas. Esse tipo de solo pode apresentar qualquer tipo de horizonte e muitas vezes são pedregosos, cascalhentos e mesmo rochosos.

Moreira (2017) afirma em seu estudo, através das observações em campo, que os solos coluvionares do perfil de solo estudado tem maior grau de intemperismo do que os solos residuais jovens (saprolíticos), apresentando um porcentual de finos maior e muito frequentemente grânulos e seixos numa matriz predominantemente arenosa.

8. PLUVIOMETRIA

Os resultados obtidos da análise estatística realizada com os dados da ANA de 1968 a 2017 são apresentados nesse capítulo. Em todos os gráficos estão ressaltados em cor mais intensa os dados selecionados para cada etapa seguinte. Seguindo a linha metodológica, são apresentados primeiro os dados de precipitação média desses 50 anos para cada estação na Figura 20, bem como os outros dados estatísticos obtidos na Tabela 7.

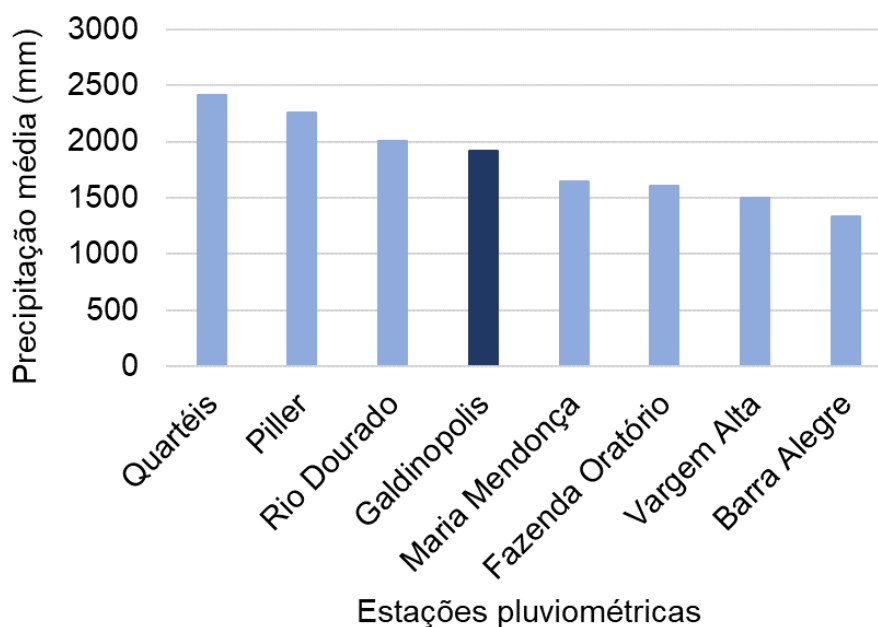


Figura 20 – Gráfico com a média da precipitação anual por estação, no período de 1968 a 2017.

A partir desses dados, foi possível chegar no mapa de isoietas pluviométricas apresentado na Figura 21. Essa estação foi selecionada comparando-se o valor médio obtido no talude com os valores médios de cada estação. O valor médio no talude, observado no mapa foi de 1830mm e a estação que mais se aproximou desse valor foi a Galdinópolis com 1921mm.

Dados pluviométricos em mm, por Estação

Estação	Média da precipitação total nos 50 anos	Média da precipitação máxima nos 50 anos	Somatório de dias chuvosos nos 50 anos	Média de dias chuvosos nos 50 anos
Barra Alegre	1.333,23	31,47	4.277,00	7,13
Fazenda Oratório	1.606,57	40,58	5.796,00	9,66
Galdinópolis	1.921,35	42,25	7.248,00	12,08
Maria Mendonça	1.643,78	34,16	7.508,00	12,51
Piller	2.256,83	50,47	7.353,00	12,26
Quartéis	2.416,76	58,22	6.461,00	10,77
Rio Dourado	2.009,34	46,98	4.743,00	7,91
Vargem Alta	1.502,21	33,04	7.249,00	12,08
Total Geral	1.836,26	42,14	6.329,38	10,55

Tabela 7 – Resumo dos dados pluviométricos de 50 anos das 8 estações selecionadas ao redor da sub-bacia do rio Sana.

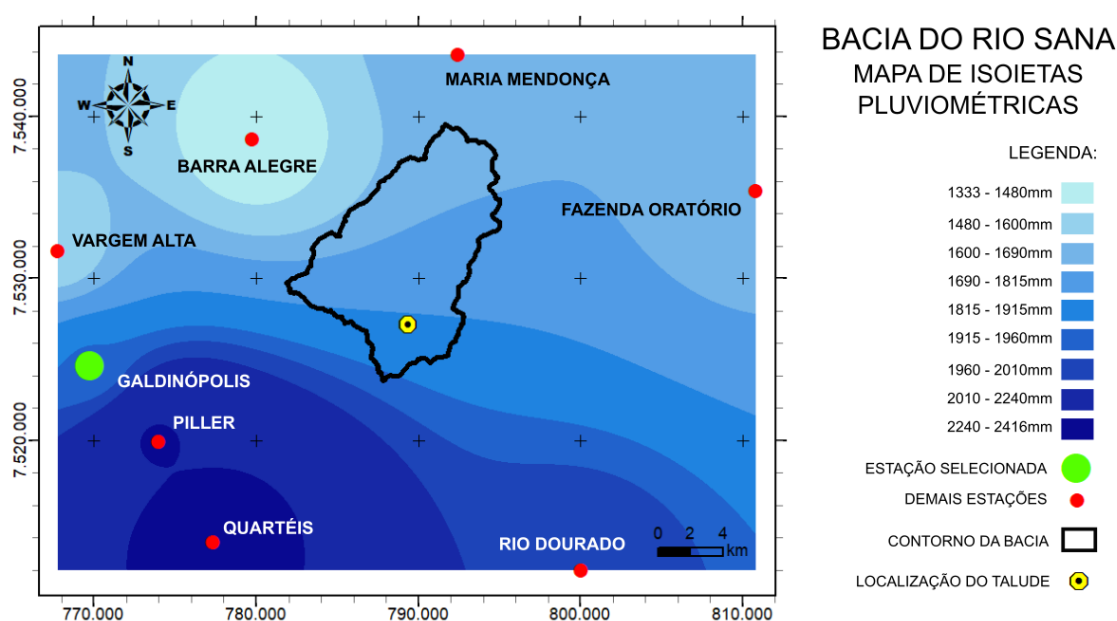


Figura 21 – Mapa de isoietas pluviométricas da bacia do rio Sana, em escala 1:200.000 – Imagem construída a partir dos resultados da análise estatística dos dados pluviométricos do banco de dados da ANA e *shapefiles* do banco de dados do INEA, utilizando o *software* ArcGIS, com *shapefiles* em escala 1:25.000, Datum SIRGAS 2000.

Dos 50 anos observados da estação Galdinópolis, o que apresentou a maior média de chuva foi 2009 e por conta disso foi selecionado para a análise. Porém é interessante observar que nessa estação existem outros picos próximos, com destaque para 1983, que teve uma pluviometria média muito próxima à ocorrida em 2009.

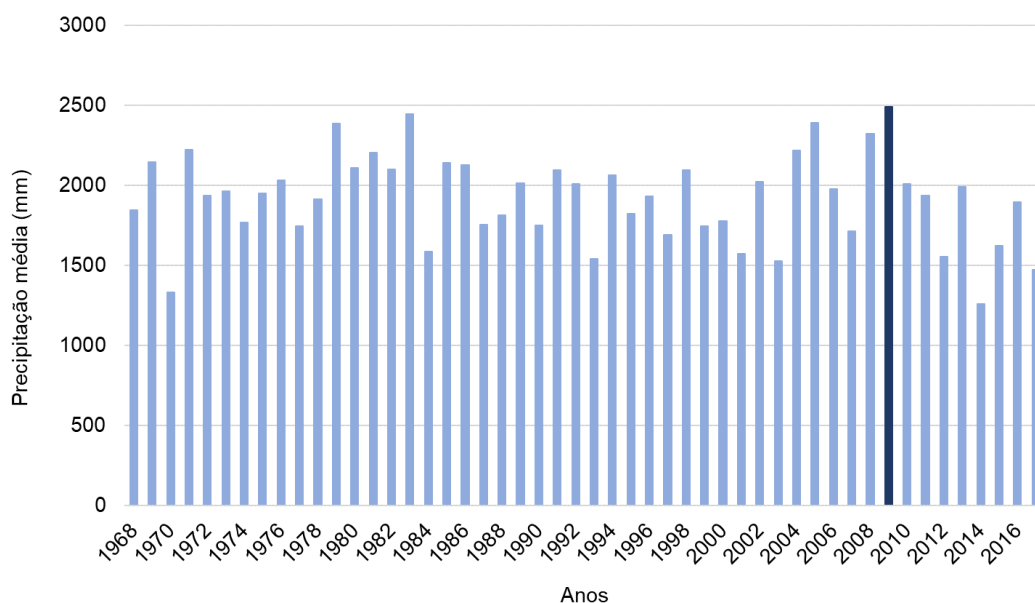


Figura 22 – Gráfico com a média da precipitação anual da estação escolhida (Galdinópolis), no período de 1968 a 2017.

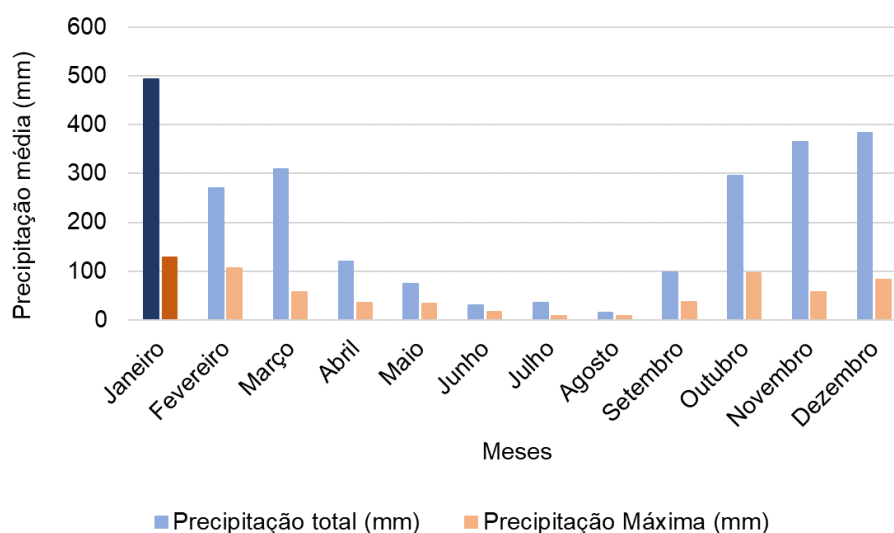


Figura 23 – Gráfico com a média da precipitação mensal da estação escolhida (Galdinópolis), no ano de 2009.

Em 2009 ocorreram precipitações bem altas para os meses de verão, com baixas taxas contrastando nos meses de inverno, o que corrobora com Freitas et al (2015), que indica uma diferença de comportamento da precipitação nessa região entre o verão e o inverno, como citado no item 2.5.

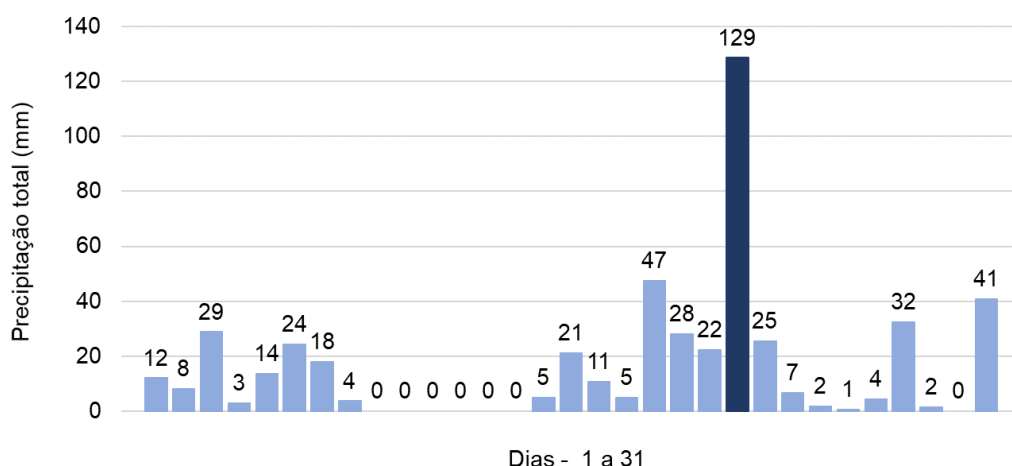


Figura 24 – Gráfico com a precipitação total diária da estação escolhida (Galdinópolis), em janeiro de 2009.

Do primeiro terço do mês em diante essa região passou por vários dias sem ocorrência de precipitação. Na metade do mês iniciou-se um período longo de chuvas que persistiu até o último dia, com um pico de 129mm no 22º dia.

Esse cenário se mostrou interessante para a escolha da análise, não apenas por ter cumprido os requisitos metodológicos propostos para a seleção do período a ser estudado, como também pela forma que essas chuvas ocorreram, vindo de um período longo seco, comparado ao total de dias chovidos, seguido de um período longo de chuvas com um pico quase três vezes maior do que a média chovida nesse período de 15 a 31 de janeiro.

9. RESULTADOS DAS ANÁLISES DE ESTABILIDADE

As análises de estabilidade considerando a influência do fluxo transiente ocasionado pelo volume de água infiltrado da precipitação ocorrida ao longo dos 17 dias estudados geraram discussões interessantes acerca do problema.

Quanto maior a porosidade de um solo arenoso menor é o teor de umidade de saturação, ou seja, é necessária uma quantidade de água menor para que uma camada arenosa tenha seus vazios completamente preenchidos por água. Contudo, solos arenosos apresentam uma condutividade hidráulica (permeabilidade) maior em condições de saturação. (SILVEIRA, LOUZADA e BELTRAME, 1993).

Esse aumento da permeabilidade em solos arenosos saturados, é devido ao fato do escoamento em meio saturado ser hidraulicamente equivalente a um escoamento sob pressão em dutos. Portanto, um solo que contenha poros maiores terá mais capacidade de conduzir o fluxo. (SILVEIRA, LOUZADA e BELTRAME, 1993).

Os horizontes B e C que constituem o perfil de solo do talude analisado apresentam uma ligeira diferença em teor de argila, sendo o horizonte C um pouco mais arenoso do que o horizonte B. (MOREIRA, 2017). Isso ocasiona uma diferença no comportamento hidráulico desses dois horizontes.

Ao observar os resultados da análise que considera o fluxo transiente nota-se que a água infiltra até o horizonte C onde percola horizontalmente até o pé do talude.

Nesse capítulo são descritos os resultados obtidos tanto da análise realizada com os ábacos de Hoek & Bray (1981) quanto os resultados da análise do modelo transiente. Como a análise que considera o fluxo gerou uma quantidade grande de resultados, são ilustradas apenas as seções críticas para cada nível de volume infiltrado estudado, sendo as demais seções apresentadas em anexo.

9.1. ANÁLISE POR ÁBACO

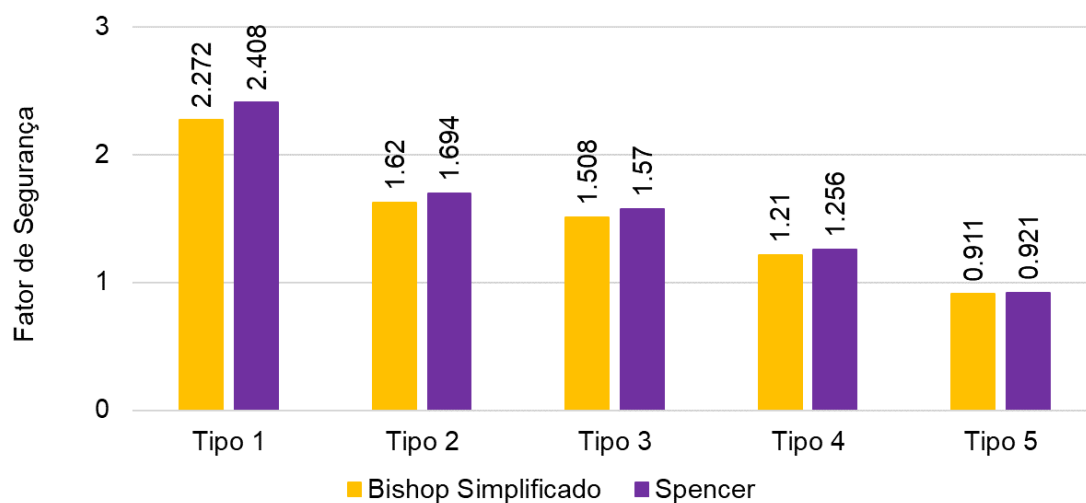


Figura 25 – Gráfico com os resultados das análises de estabilidade nas situações do ábaco de Hoek & Bray, através dos métodos de Bishop-Simplificado e Spencer.

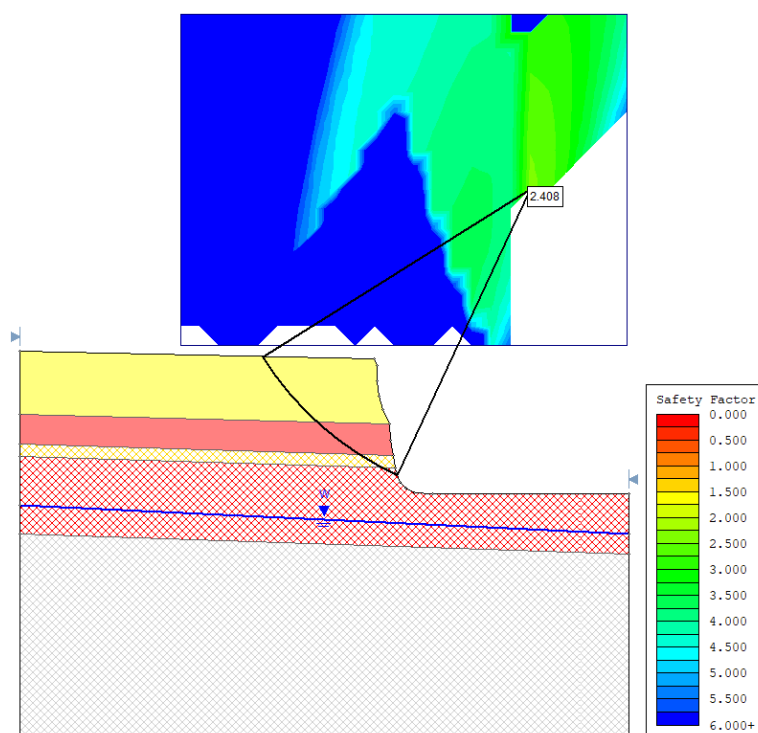


Figura 26 – Resultado da análise de estabilidade para a situação do tipo 1 do ábaco de Hoek & Bray, através do método de Spencer.

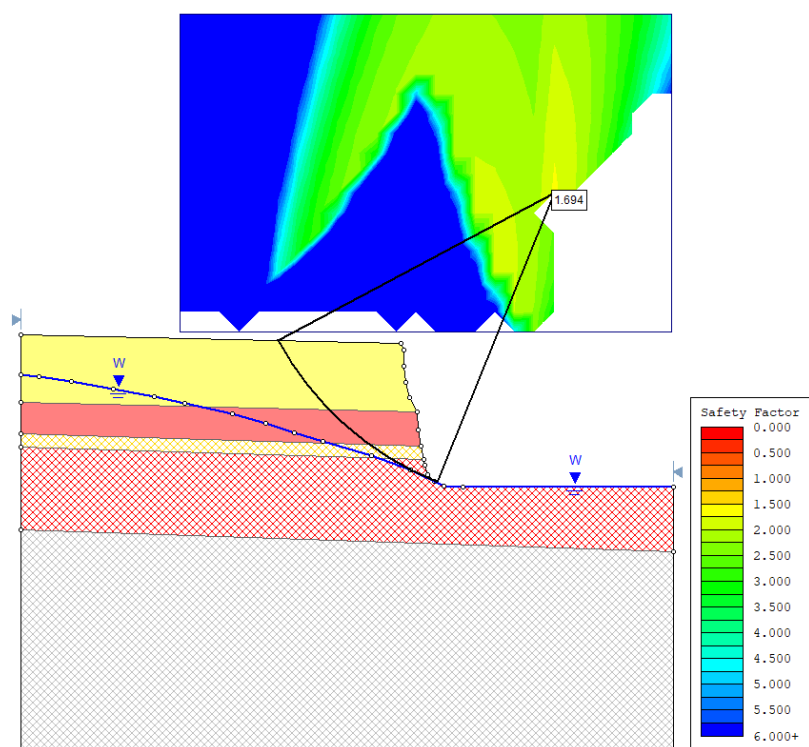


Figura 27 – Resultado da análise de estabilidade para a situação do tipo 2 do ábaco de Hoek & Bray, através do método de Spencer.

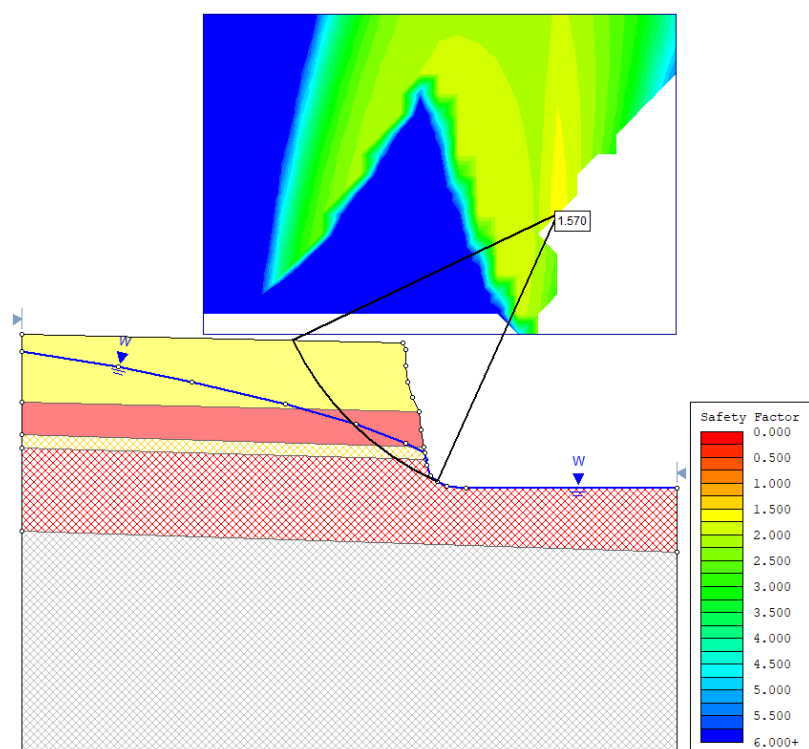


Figura 28 – Resultado da análise de estabilidade para a situação do tipo 3 do ábaco de Hoek & Bray, através do método de Spencer.

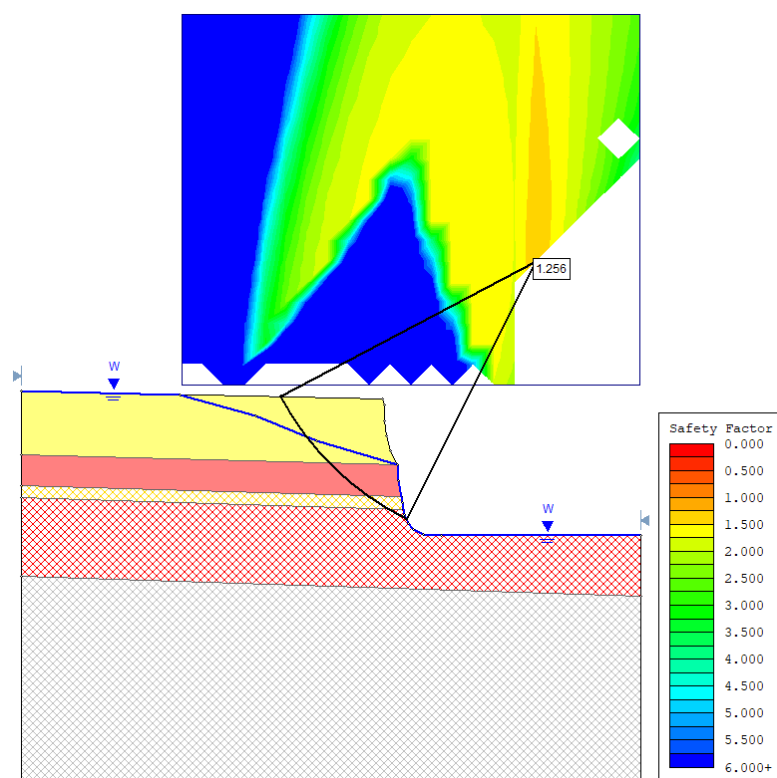


Figura 29 – Resultado da análise de estabilidade para a situação do tipo 4 do ábaco de Hoek & Bray, através do método de Spencer.

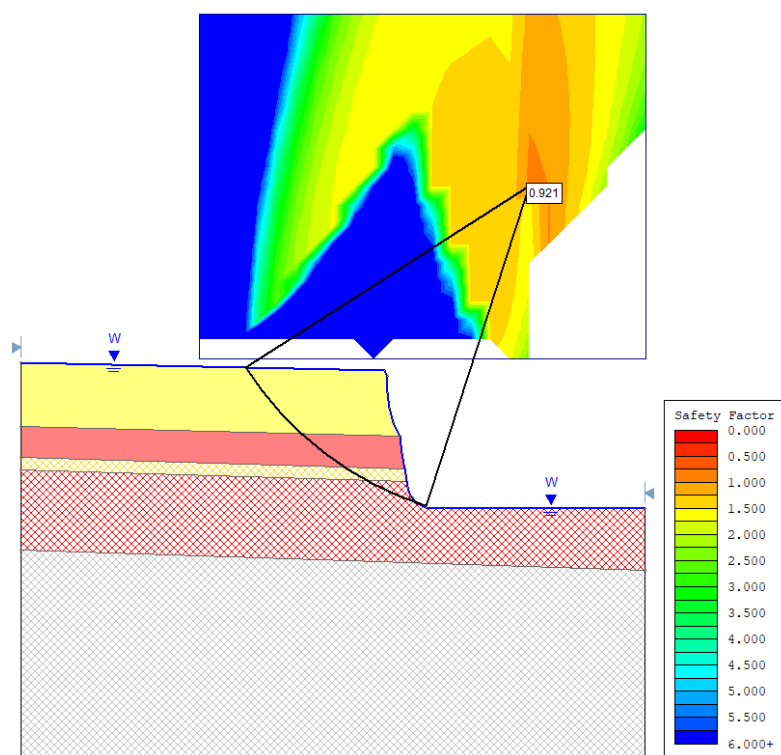


Figura 30 – Resultado da análise de estabilidade para a situação do tipo 5 do ábaco de Hoek & Bray, através do método de Spencer.

9.2. MODELO COM FLUXO TRANSIENTE

Como pode ser observado nas figuras apresentadas neste capítulo, referentes ao modelo de fluxo transiente, assim como nas figuras apresentadas nos anexos deste trabalho, a água indica um caminho preferencial de escape através das camadas que constituem o horizonte C, o que corrobora com Silveira, Louzada e Beltrame (1993), que indicam a maior condutividade hidráulica em meio saturado para solos arenosos.

Analisando as figuras desse modelo, percebe-se que o fluxo é conduzido para o pé do talude, configurando um ponto de fraqueza. A representação do caminho percorrido pelo fluxo, bem como a geometria das superfícies de ruptura observadas, indica que caso esse talude venha a sofrer uma ruptura, é bastante provável que ela aconteça nesse trecho.

Todavia os fatores de segurança obtidos tanto através do método principal de Spencer quanto através do método de Bishop-Simplificado, mostraram que o talude se mantém estável, mesmo submetido a um período intenso de chuvas.

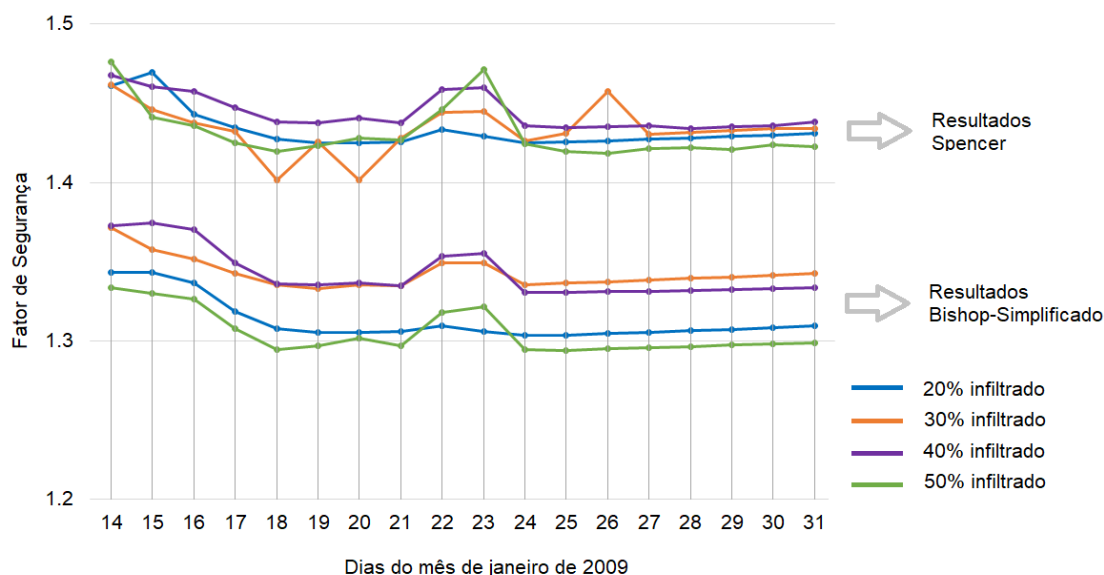


Figura 31 – Comparação ao longo do tempo entre os métodos de Spencer e Bishop-Simplificado para obtenção do fator de segurança considerando o fluxo transiente.

É interessante observar que esses dois métodos mostraram um *gap* em seus resultados, bem marcado, ilustrado na Figura 31. Essa diferença entre os resultados ocorre devido ao nível de complexidade dos cálculos realizados por cada um desses métodos. Como o método de Spencer satisfaz a todas as condições de equilíbrio estático, seus resultados são mais apurados, apresentando um nível de confiabilidade maior. O método de Bishop-Simplificado tende a ser mais conservador, para contrapor as limitações pertinentes aos seus métodos de cálculo.

Outra observação interessante é sobre o momento em que esse fator de segurança diminui. Analisando os dias próximos ao dia em que ocorreu o pico de chuva de 129mm, no dia 22 de janeiro de 2009, nota-se que esse fator de segurança não decresce instantaneamente.

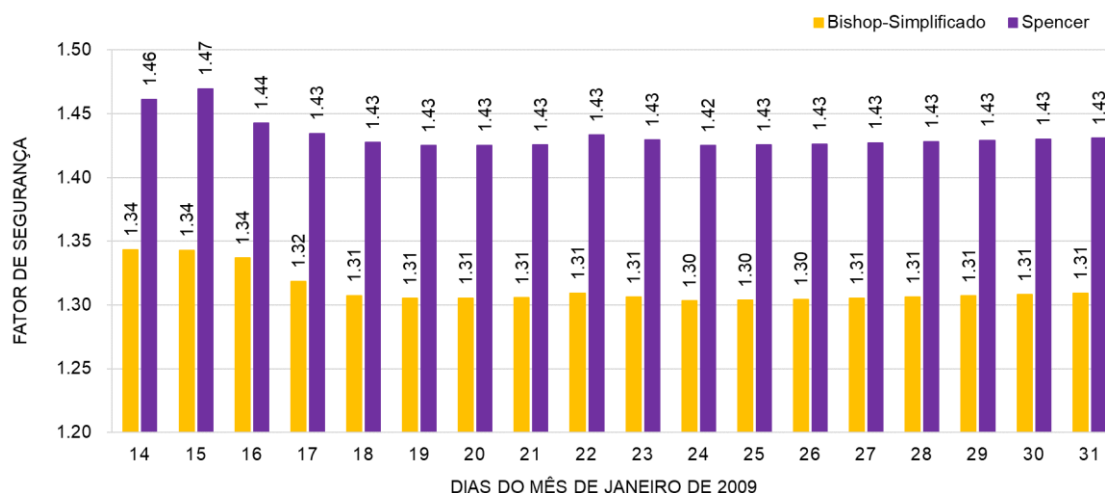


Figura 32 – Fator de segurança considerando o fluxo transiente ao longo do tempo, com 20% do total precipitado infiltrado, através dos métodos de Spencer e Bishop-Simplificado.

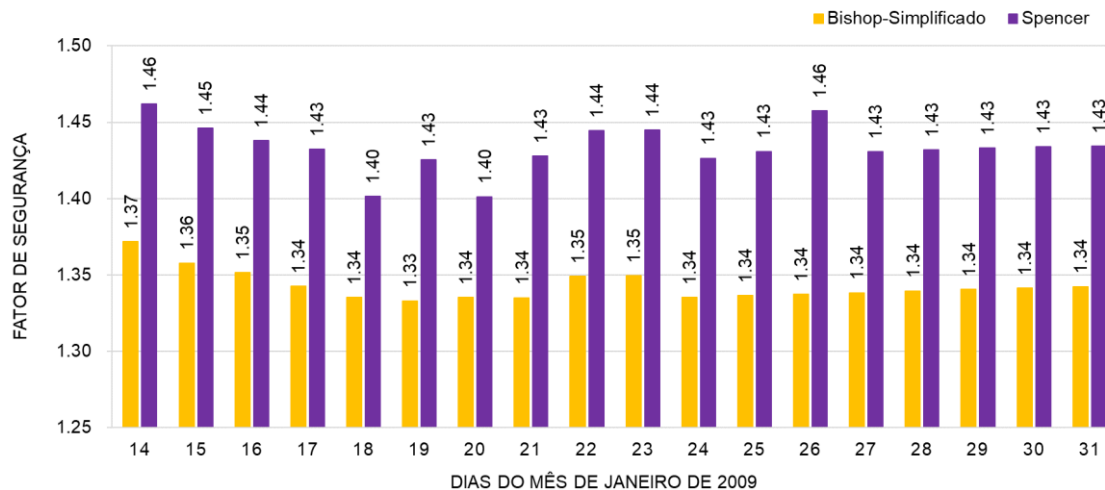


Figura 33 – Fator de segurança considerando o fluxo transiente ao longo do tempo, com 30% do total precipitado infiltrado, através dos métodos de Spencer e Bishop-Simplificado.

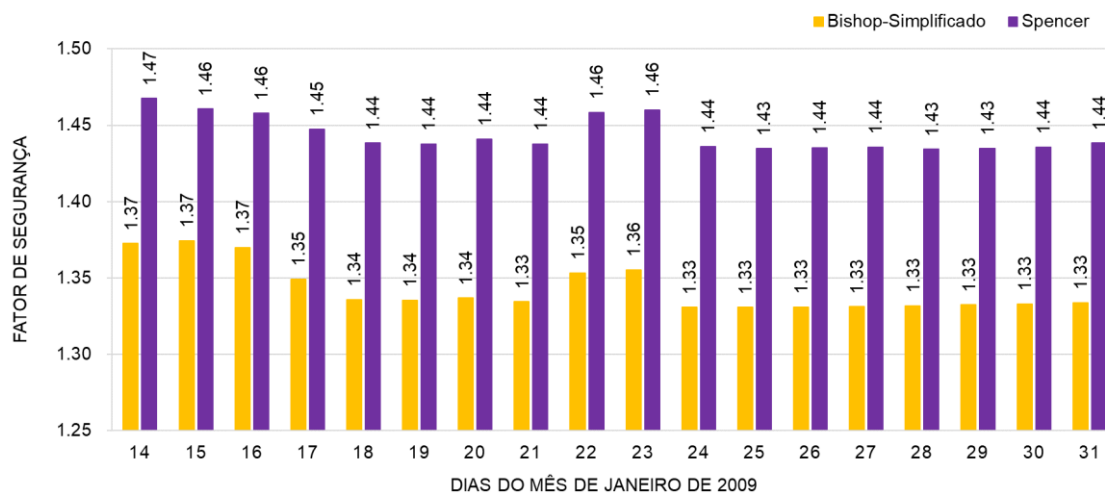


Figura 34 – Fator de segurança considerando o fluxo transiente ao longo do tempo, com 40% do total precipitado infiltrado, através dos métodos de Spencer e Bishop-Simplificado.

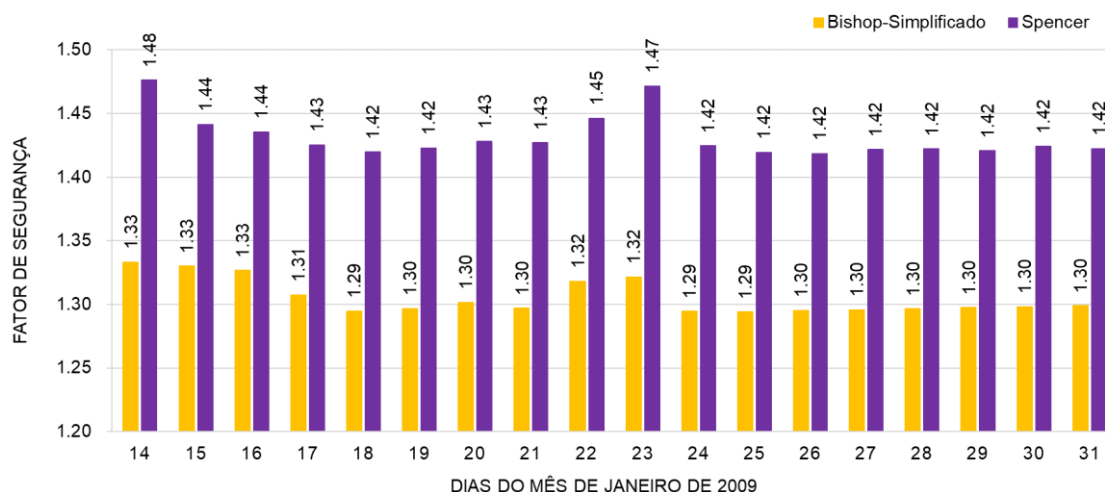


Figura 35 – Fator de segurança considerando o fluxo transiente ao longo do tempo, com 50% do total precipitado infiltrado, através dos métodos de Spencer e Bishop-Simplificado.

Ao observar o gráfico da Figura 35, onde é representada a distribuição dos fatores de segurança ao longo do tempo estudado, considerando uma infiltração de 50% do total precipitado, percebe-se que o dia posterior ao dia em que ocorreu o pico de chuva apresenta um fator de segurança ainda maior que o fator de segurança observado no dia anterior. Porém o dia 24 de janeiro apresenta uma queda do fator de segurança em relação aos dias anteriores.

Essa pequena diferença é observada também para as demais situações analisadas, nas quais o volume infiltrado é baseado em 20%, 30% e 40% do total precipitado. Porém essas diferenças se atenuam conforme decresce o volume infiltrado.

As figuras a seguir mostram as seções que apresentaram o menor fator de segurança para cada situação de infiltração. As diferenças encontradas na correção entre nível freático e fator de segurança nos dois modelos utilizados mostra que existem muitas incertezas sobre as relações existentes entre os vários fatores que constituem o equilíbrio de forças atuantes no ambiente.

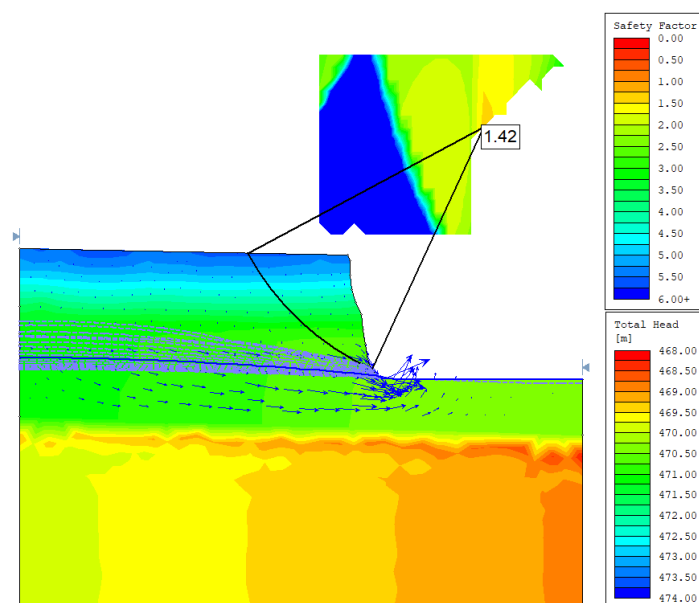


Figura 36 – Fator de segurança da seção crítica considerando o fluxo transiente ao longo do tempo, com 20% do total precipitado infiltrado, através dos métodos de Spencer. Seção referente ao dia 24/01/2009, apresentando a flutuação do nível freático em todas as seções ao longo do período.

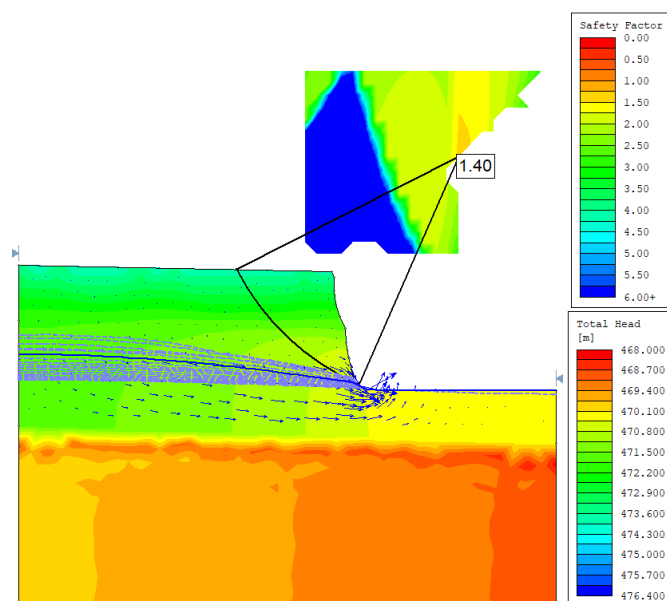


Figura 37 – Fator de segurança da seção crítica considerando o fluxo transiente ao longo do tempo, com 30% do total precipitado infiltrado, através dos métodos de Spencer. Seção referente ao dia 20/01/2009, apresentando a flutuação do nível freático em todas as seções ao longo do período.

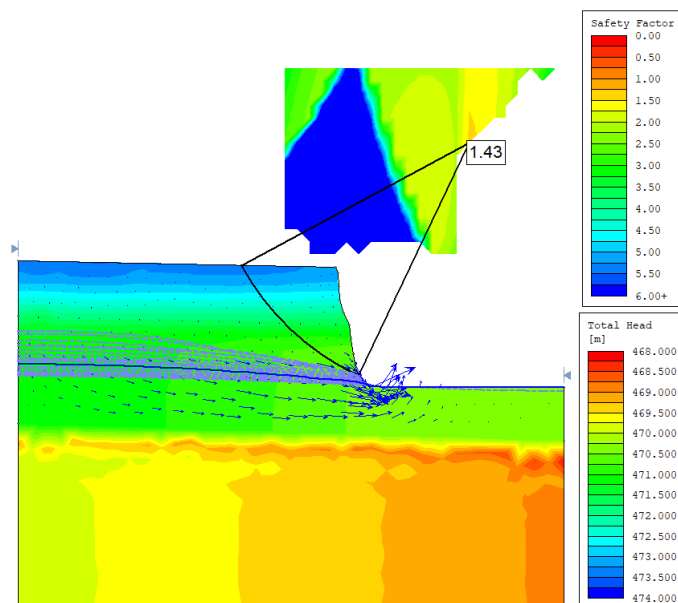


Figura 38 – Fator de segurança da seção crítica considerando o fluxo transiente ao longo do tempo, com 40% do total precipitado infiltrado, através dos métodos de Spencer. Seção referente ao dia 25/01/2009, apresentando a flutuação do nível freático em todas as seções ao longo do período.

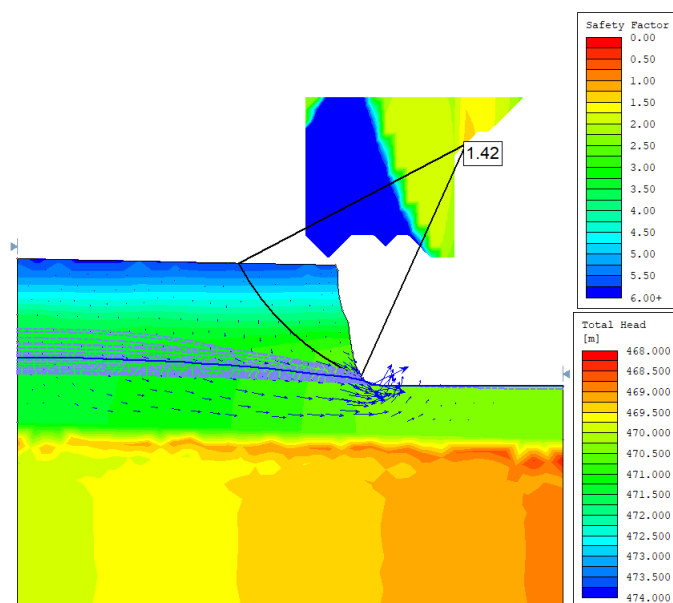


Figura 39 – Fator de segurança da seção crítica considerando o fluxo transiente ao longo do tempo, com 50% do total precipitado infiltrado, através dos métodos de Spencer. Seção referente ao dia 24/01/2009, apresentando a flutuação do nível freático em todas as seções ao longo do período.

10. CONCLUSÃO

Através dessa análise, é possível concluir que uma análise mais sofisticada, onde são consideradas as propriedades hidráulicas do meio estudado, acarretam em resultados que se aproximam melhor das condições reais. Comparando os resultados obtidos na análise em que é considerado o fluxo transiente com os resultados obtidos através das situações típicas dos ábacos de Hoek & Bray (1981), nota-se que a faixa de valores dos fatores de segurança calculados pelo modelo de fluxo transiente, tanto pelo método de Spencer, quanto pelo método de Bishop-Simplificado, é equiparada com a faixa de valores entre os tipos 3 e 4 dos ábacos de Hoek & Bray.

No entanto, ao observar o nível freático apresentado nas situações 3 e 4 dos ábacos e a faixa de variação do nível freático no modelo de fluxo transiente para todas as situações diferentes de taxa de infiltração analisadas, nota-se uma diferença acentuada.

O nível freático mais alto obtido através do modelo de fluxo é ainda mais baixo que a situação do tipo 2 do ábaco de Hoek & Bray, porém o fator de segurança é menor do que o calculado através do ábaco. Isso ocorre pois, existem muitas variáveis que influenciam na estabilidade de um talude ou uma encosta, sendo o nível freático apenas uma delas.

O equilíbrio que existe entre as propriedades dos sólidos e as propriedades dos fluidos é que dita como essa dinâmica ocorre. Portanto, em uma análise onde são considerados mais argumentos representativos dessa equação, os resultados obtidos tendem a representar melhor a realidade em campo.

Atentando-se ao fato de que esse modelo estudado não considera todas as relações pertinentes ao conjunto, inserindo apenas a influência do fluxo da água, é válido citar que a qualidade dos resultados obtidos depende do nível de informação agregado, bem como as condições de contorno estabelecidas no modelo. O modelo apresentado nesse estudo, apesar de satisfazer os objetivos

de análise pode ser melhorado com informações que agreguem ao entendimento da dinâmica real.

Algumas informações, como a permeabilidade adotada para o meio, foram estimadas através de comparação com a bibliografia, devido à falta de tempo hábil para a realização de ensaios *insitu*. Informações como esta podem refinar a análise e conduzir a um resultado ainda mais próximo da realidade.

Outra sugestão é sobre as especificações dos métodos de análise. Esse estudo realizou análises considerando apenas superfícies circulares de modo a simplificar e otimizar a condução da pesquisa, porém seria importante analisar outras formas de ruptura como as planares e as mistas.

Os dados pluviométricos utilizados são baseados em valores diários, e o volume de água infiltrado foi considerado a partir do total infiltrado distribuído ao longo do dia, pois como a região é marcada por chuvas orográficas que são caracterizadas por chuvas de longa duração e os dados disponíveis não continham um nível de detalhamento maior, qualquer inferência de concentração das chuvas poderia conduzir a pesquisa a erros.

Portanto, como última sugestão, um estudo de maior detalhe com dados pluviométricos por hora, como os disponibilizados pelo INMET, bem como estudos que agreguem ao conhecimento da capacidade de infiltração dos solos deste local mostram-se relevantes para a continuação do refinamento dos resultados.

Esse estudo teve como objetivo, não somente aplicar as técnicas de análise de estabilidade, de forma a utilizar o conhecimento agregado durante o curso de Geologia e aplica-los nessa etapa de conclusão acadêmica, como também agregar valor, mesmo que minimamente, ao entendimento do comportamento desse importante agente que é a água, e a influência que ele gera na estabilidade de taludes.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANA – **Apostila de capacitação: Práticas mecânicas de conservação de água e solo.** <https://capacitacao.ana.gov.br/conhecerh/handle/ana/62> (Acessado em dezembro de 2018).

BETIM, Luiza Silva. **Caracterização da condutividade hidráulica dos solos e estudo da vulnerabilidade à contaminação dos aquíferos da sub-bacia do Córrego Palmital - Viçosa/MG.** 2013. 186 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2013.

CARDUCCI, Carla Eloize. et. al. **Modelagem da Curva de Retenção de Água de Latossolos Utilizando a Equação Duplo Van Genuchten.** (2011)

CAPUTO, Homero Pinto. **Mecânica dos solos e suas aplicações.** 5. ed. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos Editora S.a., 1980. 2 v.

DUARTE, Nathalia Silva. **Conectividade no Sistema de Drenagem do Rio Sana, Afluente do Rio Macaé (RJ).** 2015. 97 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Geografia, Departamento de Geografia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2015.

FERNANDES, Luís Renato Palha Teixeira. **A influência da infiltração das chuvas na estabilidade de um talude natural.** 2014. 85 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia, Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2014.

FILHO, Oswaldo Augusto e VIRGILI, José Carlos (1998) – **Estabilidade de Taludes in Geologia de Engenharia.** ABGE – Associação Brasileira de Geologia de Engenharia, pp 243-269. Oliveira e Brito 1 ed., São Paulo: Oficina de Livros, 1998.

FREITAS, Leonardo de Esteves et al. **Atlas Ambiental da Bacia Hidrográfica do Rio Macaé.** Rio de Janeiro: Nova Tríade do Brasil Ltda., 2015.

GERALDES, Mauro Cesar et al. **Mapa Geológico da Folha Casimiro de Abreu (RJ) SF.23-Z-B-III. Escala 1:100.000.** CPRM Serviço Geológico do Brasil - UERJ. 2009. 10.13140/RG.2.1.4286.9927.

IBGE (2007) **Manual Técnico de Pedologia in Manuais Técnicos em Geociências**. Roberto Cavararo 2 ed. ISBN 978-85-240-3722-9.

MOREIRA, Rafael Ferro. **Avaliação da Erodibilidade de Perfil de Solo em Talude de Corte, Sub-Bacia do Rio Sana, RJ**. 2017. 138 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Geologia, Departamento de Geologia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2017.

NOGUEIRA, Nuno Alexandre Castanheira Cruz. **Análise de estabilidade de taludes artificiais: Técnicas e métodos para avaliação da estabilidade**. 2010. 144 f. Dissertação (Mestrado) - Faculdade de Ciências, Departamento de Geologia, Universidade de Lisboa, Lisboa, 2010.

PAZ, Adriano Rolim da. **Hidrologia Aplicada**. Texto Básico de Disciplina - Curso de Graduação em Engenharia de Bioprocessos e Biotecnologia, Universidade Estadual do Rio Grande do Sul. Setembro, 2004.

ROCSCIENCE. **Tutoriais dos módulos Transient Groundwater Analysis e Transient Groundwater Analysis with Slope Stability** https://www.rocscience.com/help/slide2/tutorials/Slide_Tutorials.htm (Acessado em dezembro de 2018)

SILVEIRA, André L. da, LOUZADA, José A. e BELTRAME, Lawson F. (1993) – **Infiltração e Armazenamento no Solo in Hidrologia: Ciência e Aplicação**. Organizado por Carlos E. M. Tucci, pp 335-366. Porto Alegre: Ed. Da Universidade EDUSP – Coleção ABRH de Recursos Hídricos, v. 4, 1993

WYLLIE, Duncan C.; MAH, Christopher W. **Rock Slope Engineering**. 4. ed. Usa: Taylor & Francis E-library, 2005.

ANEXO A

Resultados da análise de estabilidade com fluxo transiente, considerando infiltração de 20% do total precipitado.

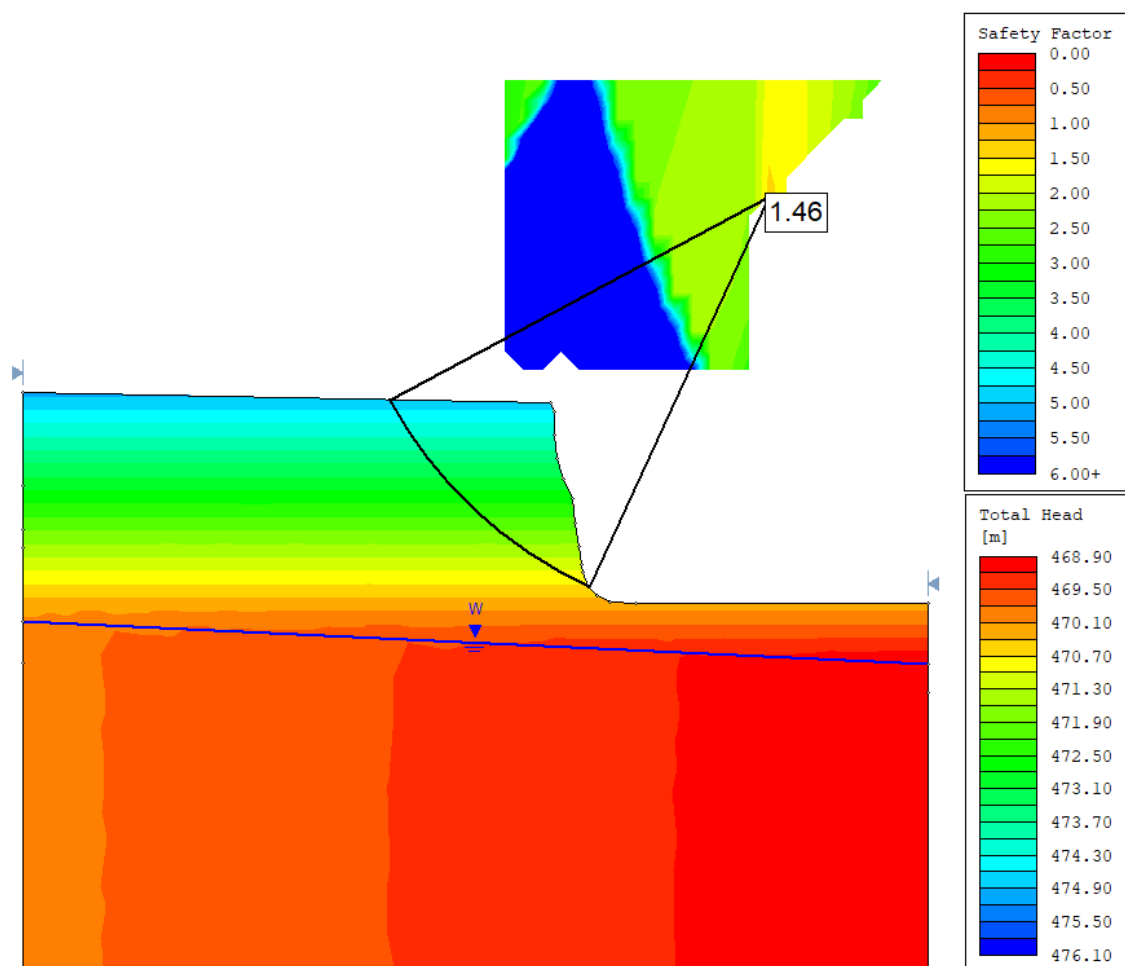


Figura 40 – Resultado da análise de estabilidade do dia inicial (14/01/2009), anterior ao período de precipitação analisado, com 20% de infiltração, através do método de Spencer.

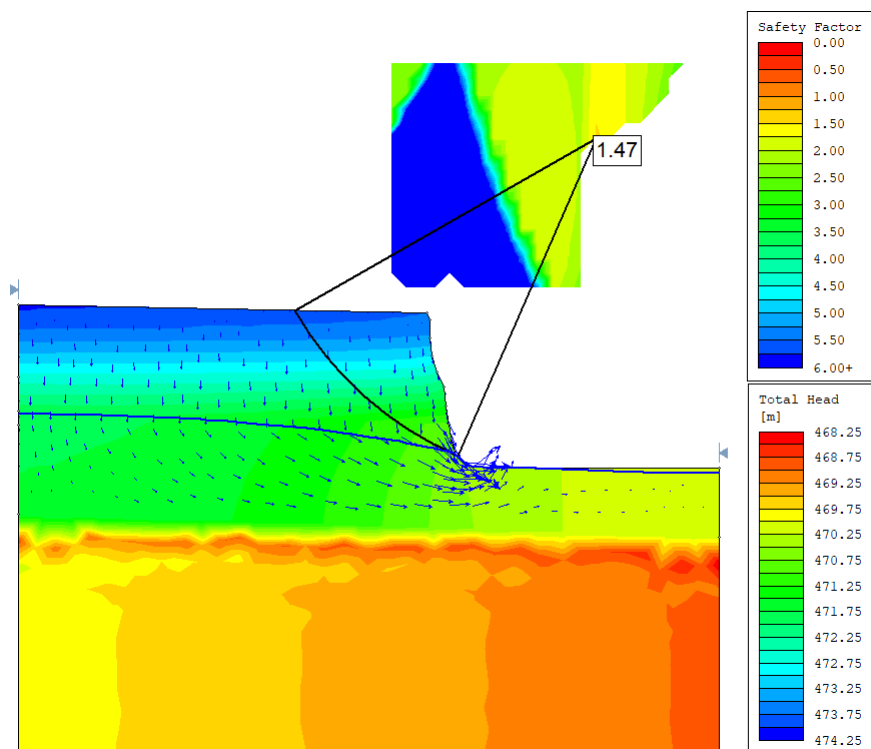


Figura 41 – Resultado da análise de estabilidade do 1º dia do período analisado (15/01/2009), com 20% de infiltração, através do método de Spencer.

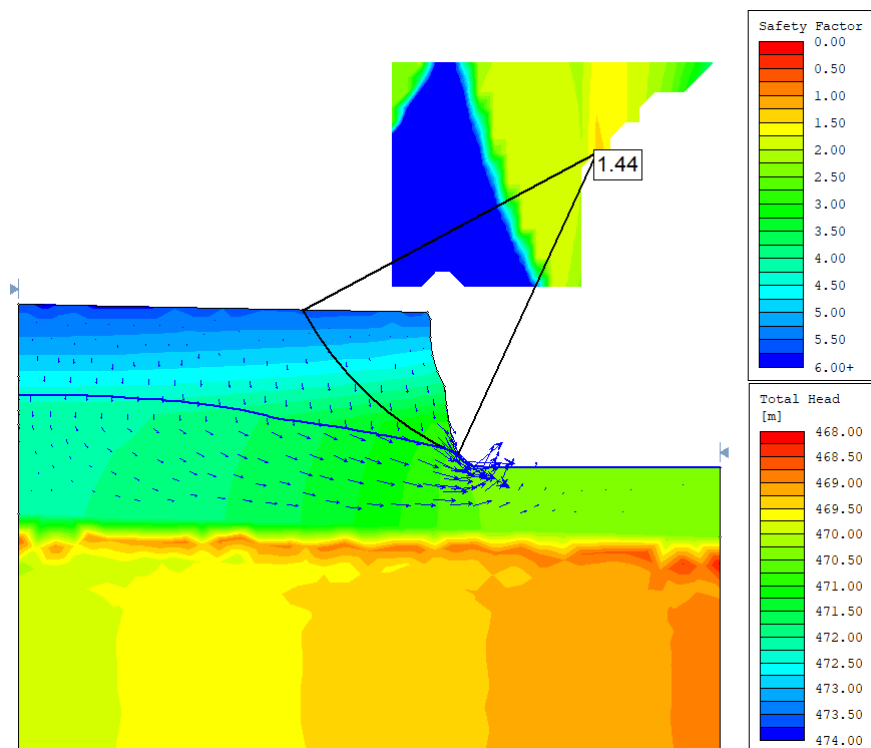


Figura 42 – Resultado da análise de estabilidade do 2º dia do período analisado (16/01/2009), com 20% de infiltração, através do método de Spencer.

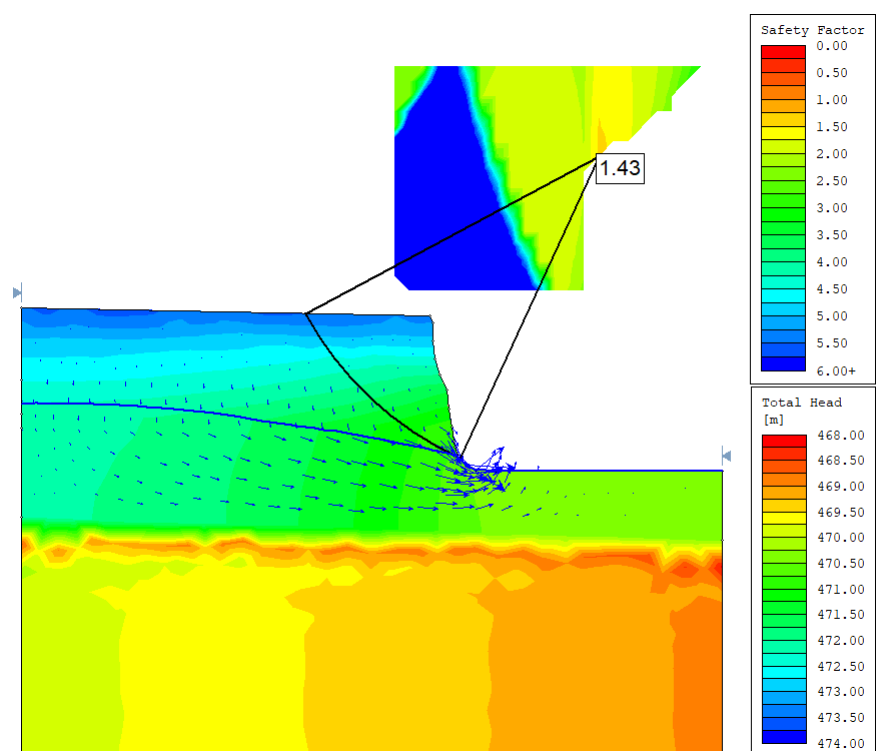


Figura 43 – Resultado da análise de estabilidade do 3º dia do período analisado (17/01/2009), com 20% de infiltração, através do método de Spencer.

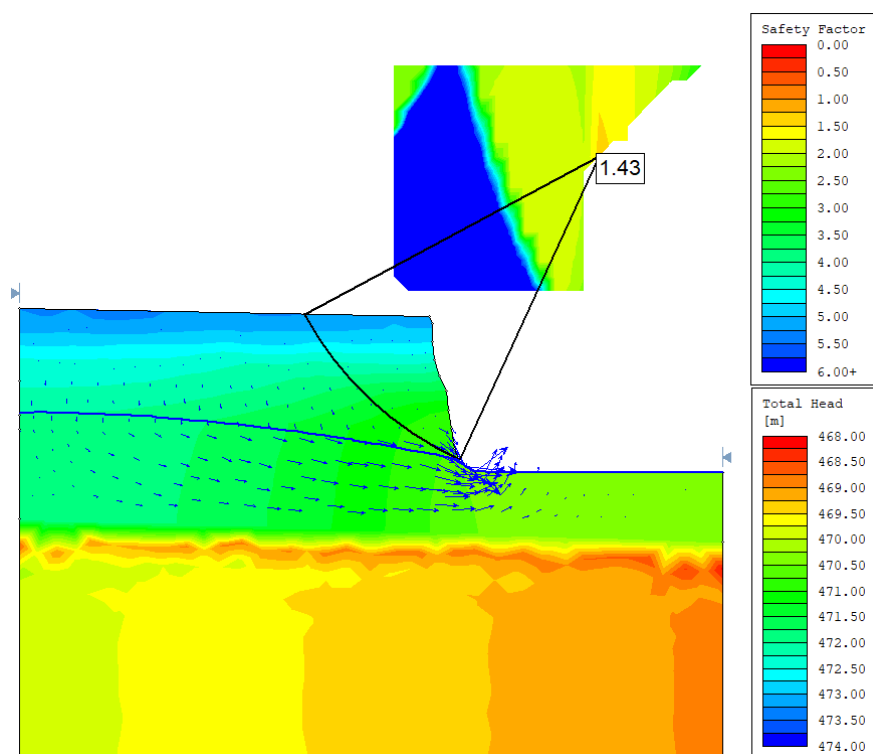


Figura 44 – Resultado da análise de estabilidade do 4º dia do período analisado (18/01/2009), com 20% de infiltração, através do método de Spencer.

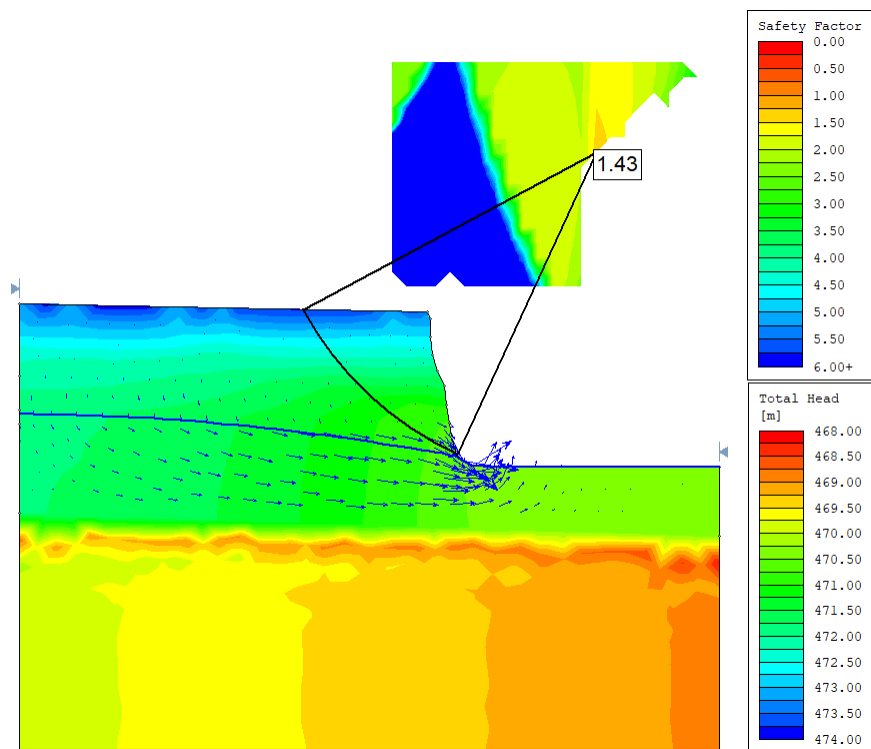


Figura 45 – Resultado da análise de estabilidade do 5º dia do período analisado (19/01/2009), com 20% de infiltração, através do método de Spencer.

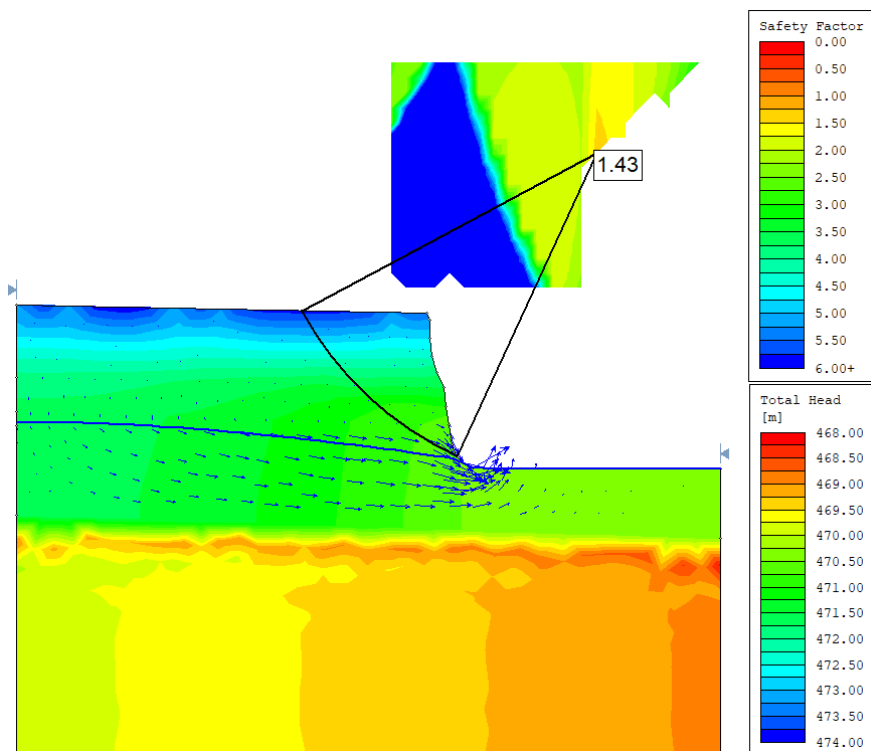


Figura 46 – Resultado da análise de estabilidade do 6º dia do período analisado (20/01/2009), com 20% de infiltração, através do método de Spencer.

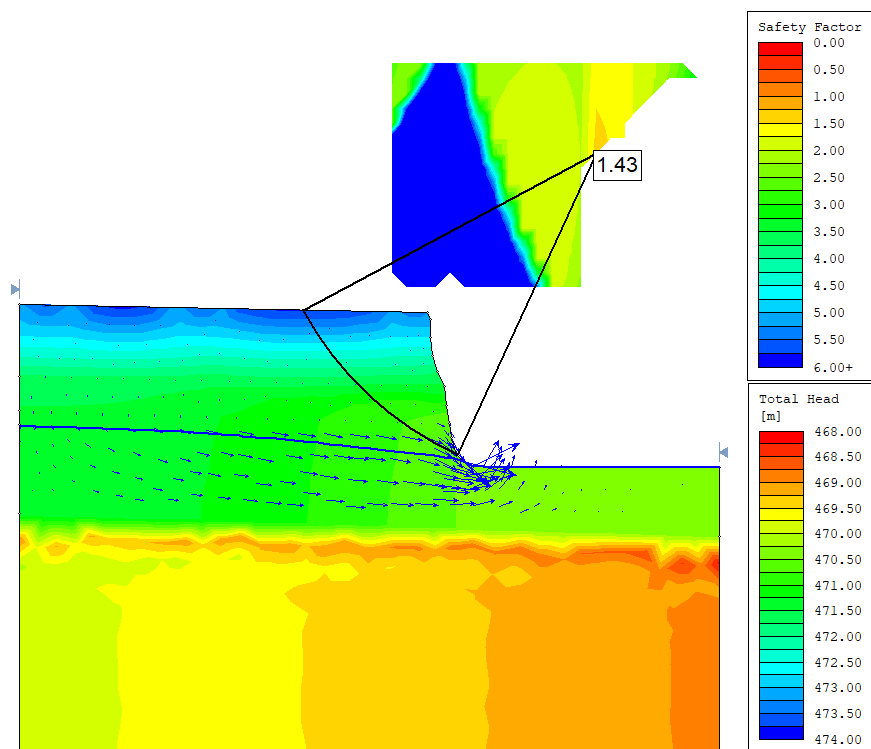


Figura 47 – Resultado da análise de estabilidade do 7º dia do período analisado (21/01/2009), com 20% de infiltração, através do método de Spencer.

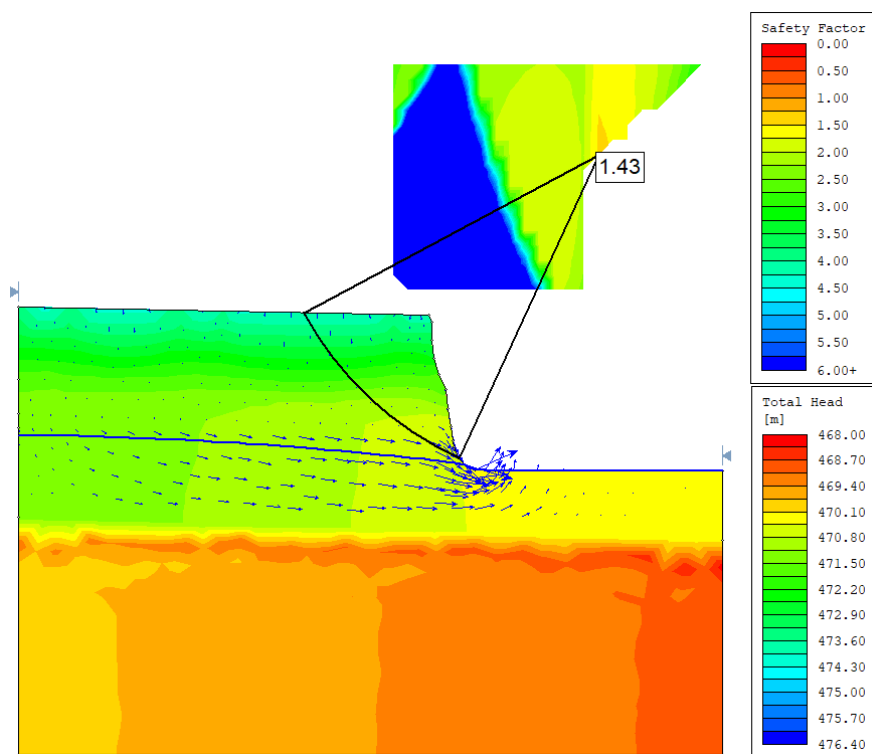


Figura 48 – Resultado da análise de estabilidade do 8º dia do período analisado (22/01/2009), com 20% de infiltração, através do método de Spencer.

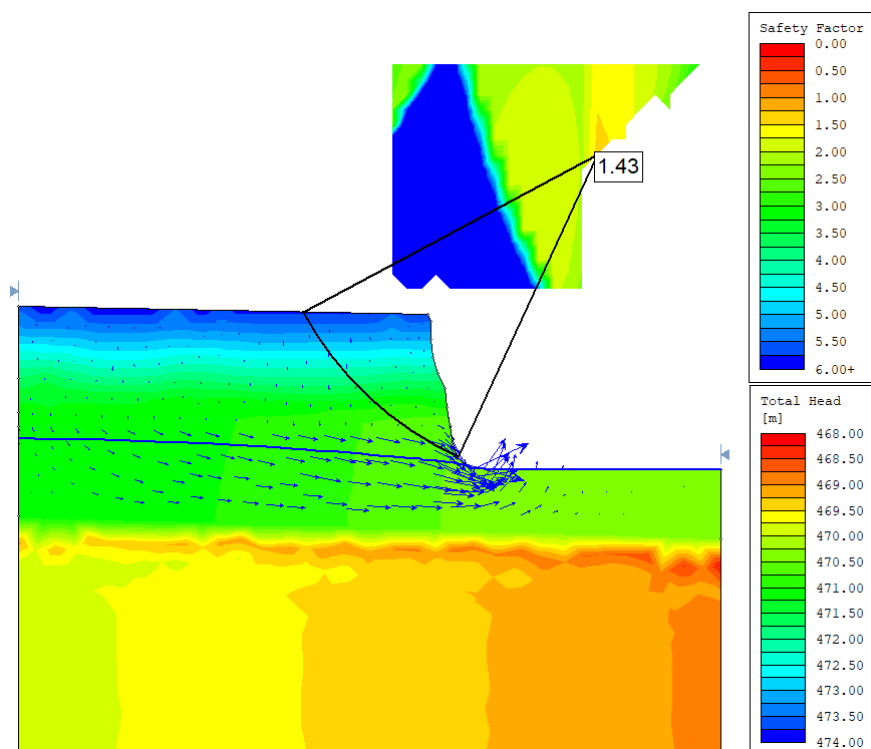


Figura 49 – Resultado da análise de estabilidade do 9º dia do período analisado (23/01/2009), com 20% de infiltração, através do método de Spencer.

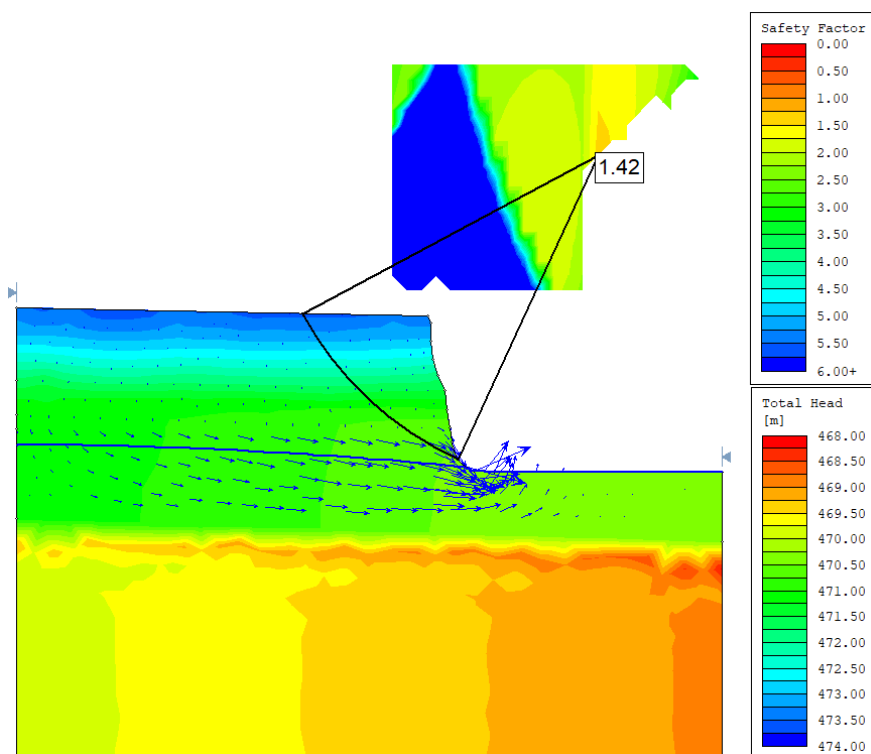


Figura 50 – Resultado da análise de estabilidade do 10º dia do período analisado (24/01/2009), com 20% de infiltração, através do método de Spencer.

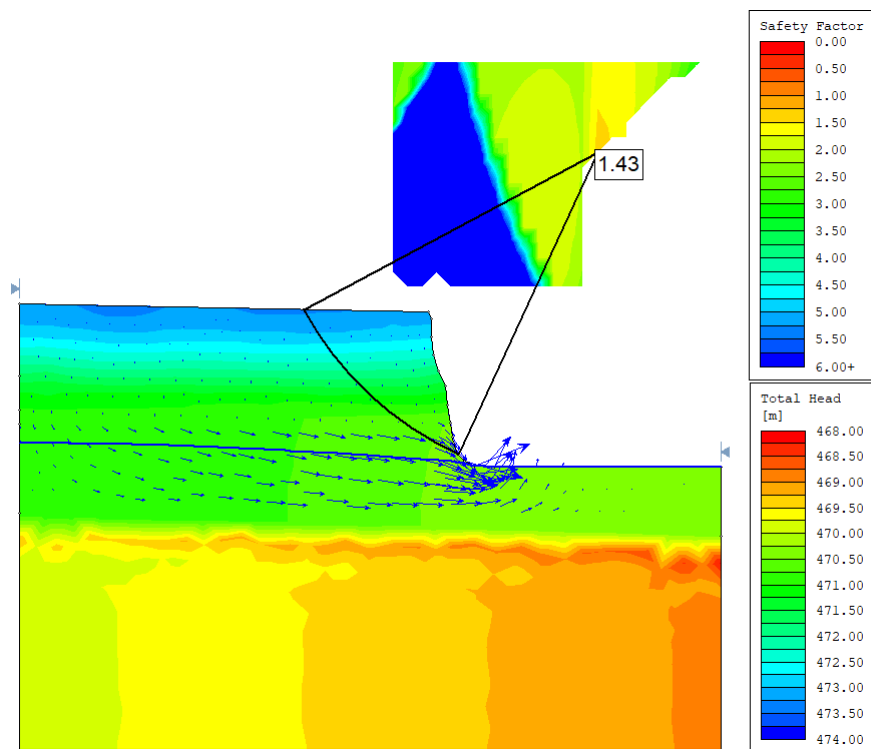


Figura 51 – Resultado da análise de estabilidade do 11º dia do período analisado (25/01/2009), com 20% de infiltração, através do método de Spencer.

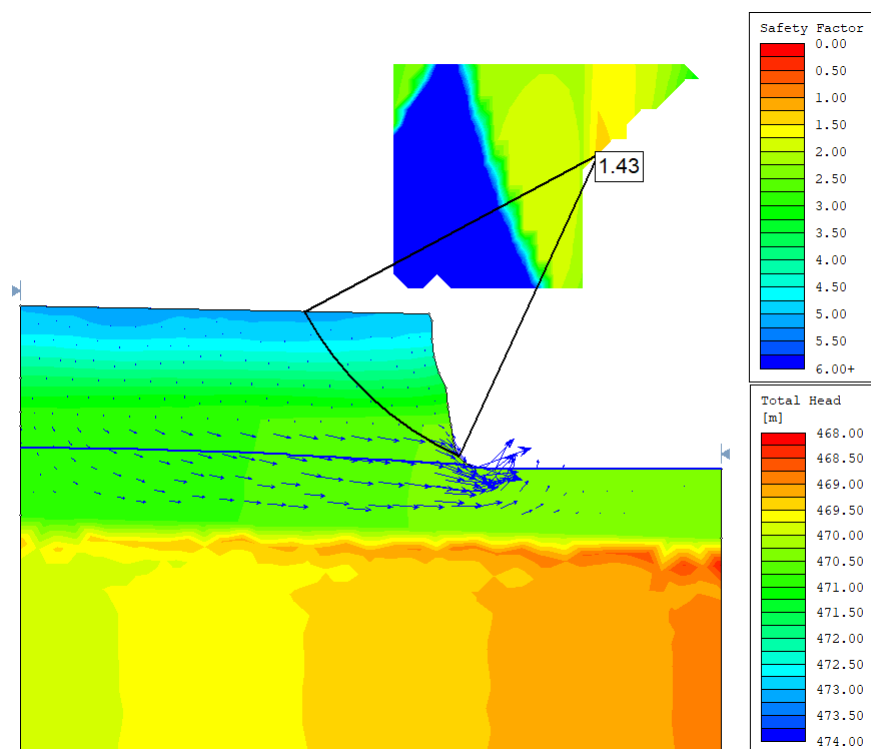


Figura 52 – Resultado da análise de estabilidade do 12º dia do período analisado (26/01/2009), com 20% de infiltração, através do método de Spencer.

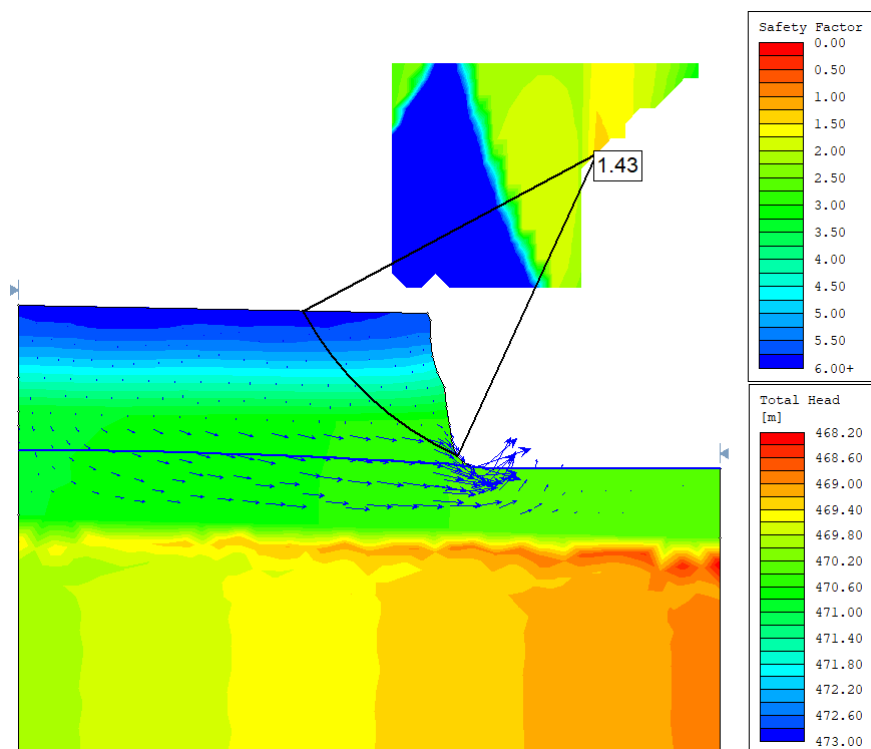


Figura 53 – Resultado da análise de estabilidade do 13º dia do período analisado (27/01/2009), com 20% de infiltração, através do método de Spencer.

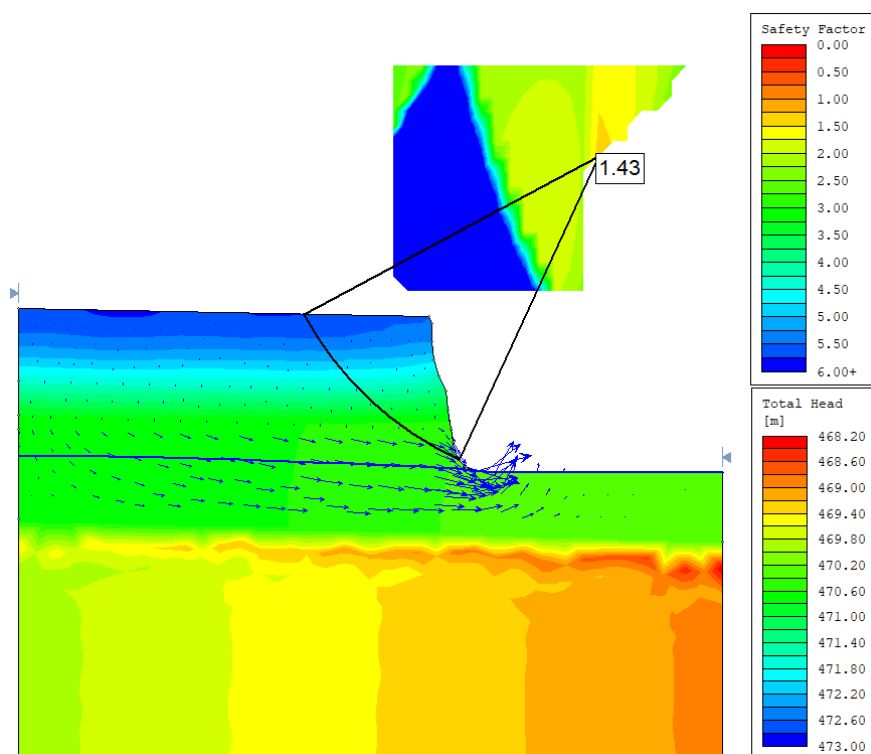


Figura 54 – Resultado da análise de estabilidade do 14º dia do período analisado (28/01/2009), com 20% de infiltração, através do método de Spencer.

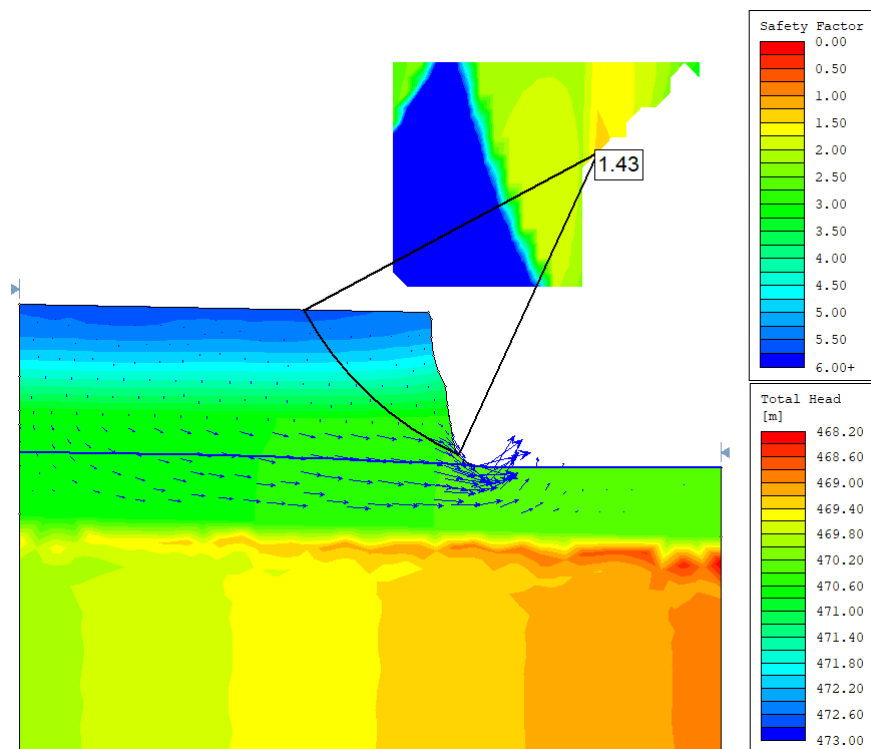


Figura 55 – Resultado da análise de estabilidade do 15º dia do período analisado (29/01/2009), com 20% de infiltração, através do método de Spencer.

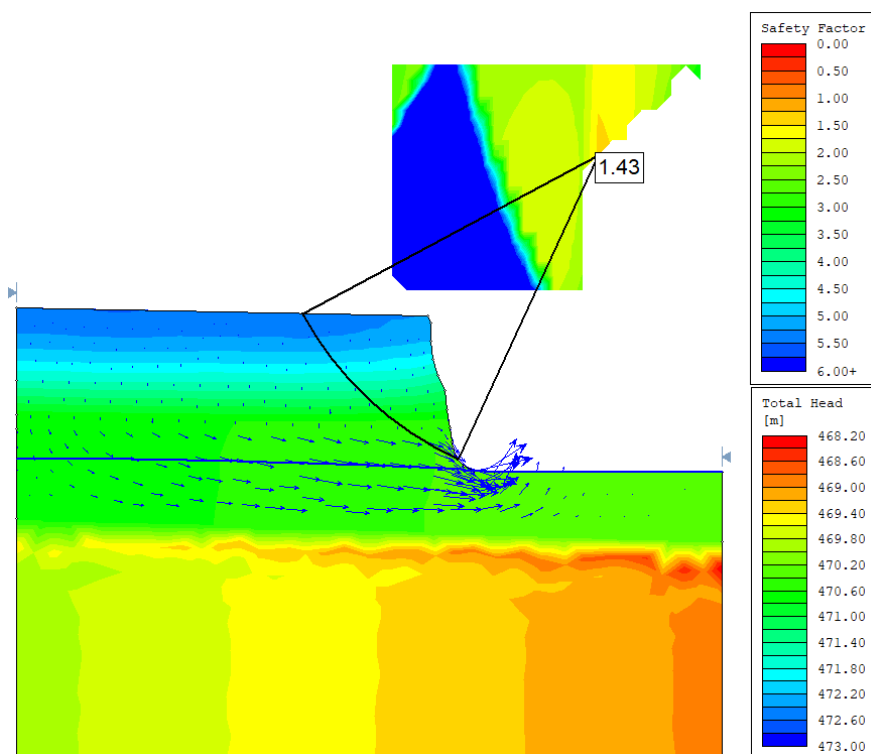


Figura 56 – Resultado da análise de estabilidade do 16º dia do período analisado (30/01/2009), com 20% de infiltração, através do método de Spencer.

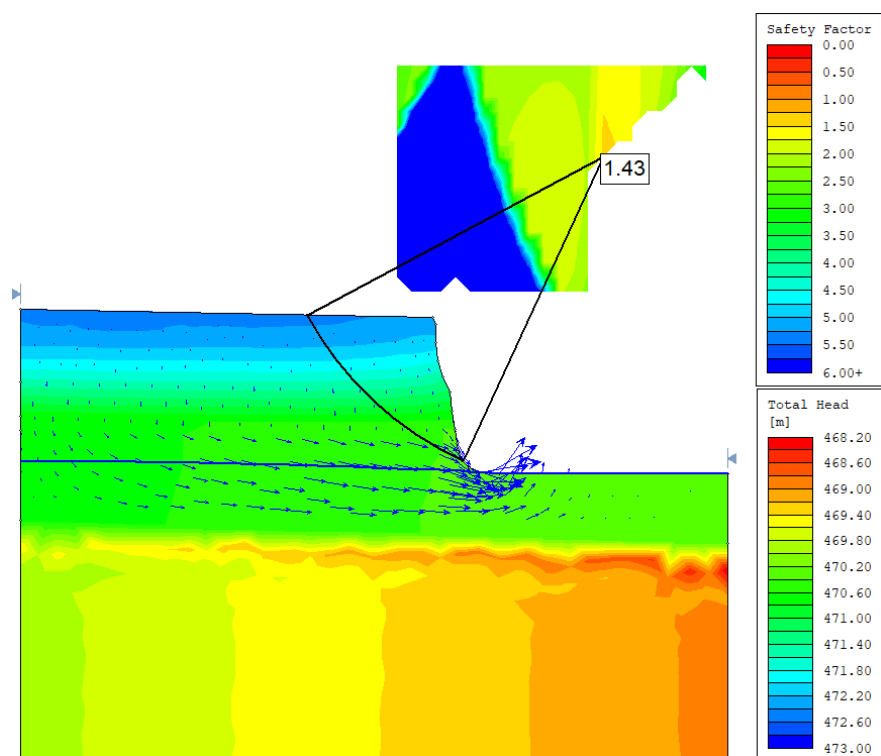


Figura 57 – Resultado da análise de estabilidade do 17º dia do período analisado (31/01/2009), com 20% de infiltração, através do método de Spencer.

ANEXO B

Resultados da análise de estabilidade com fluxo transiente, considerando infiltração de 30% do total precipitado.

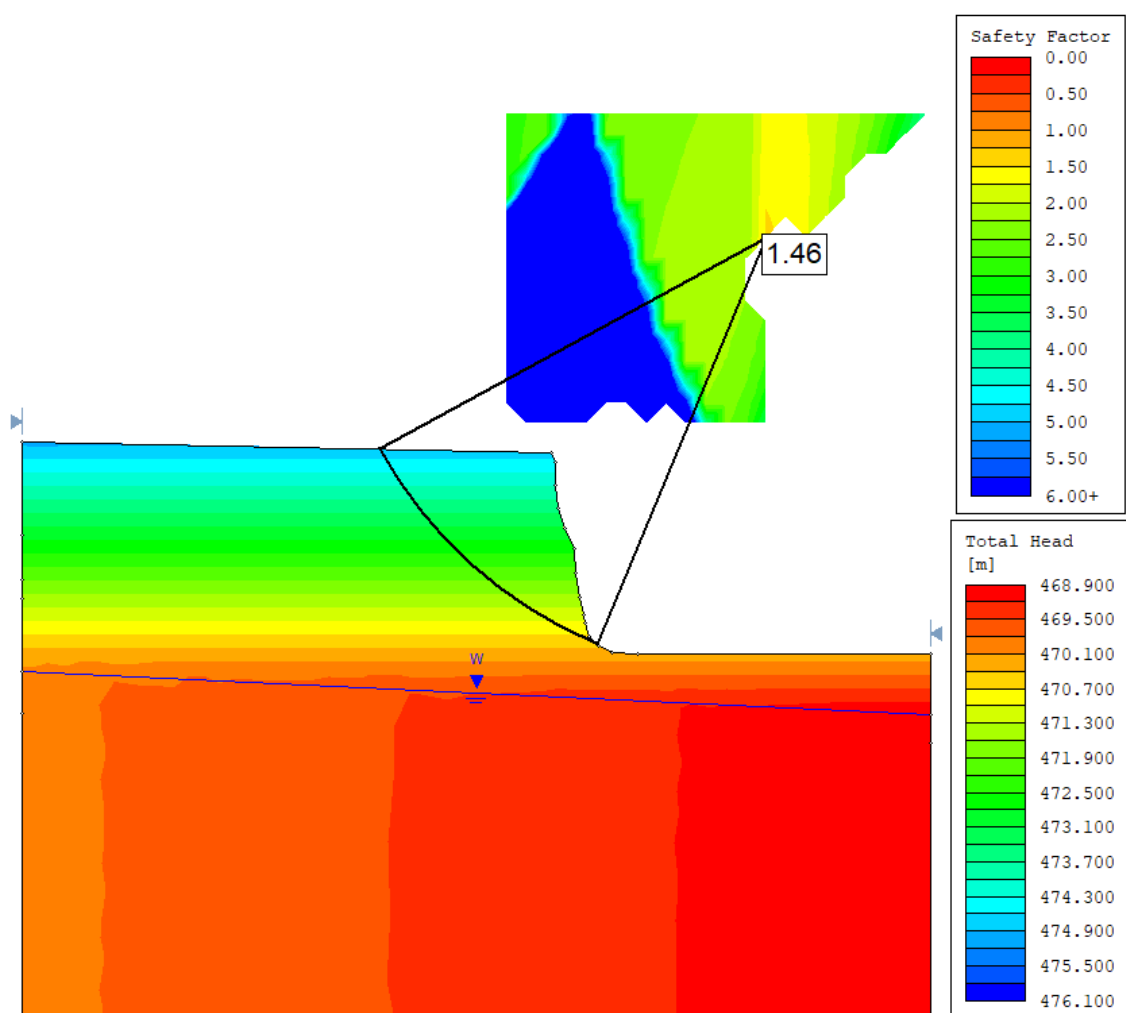


Figura 58 – Resultado da análise de estabilidade do dia inicial (14/01/2009), anterior ao período de precipitação analisado, com 30% de infiltração, através do método de Spencer.

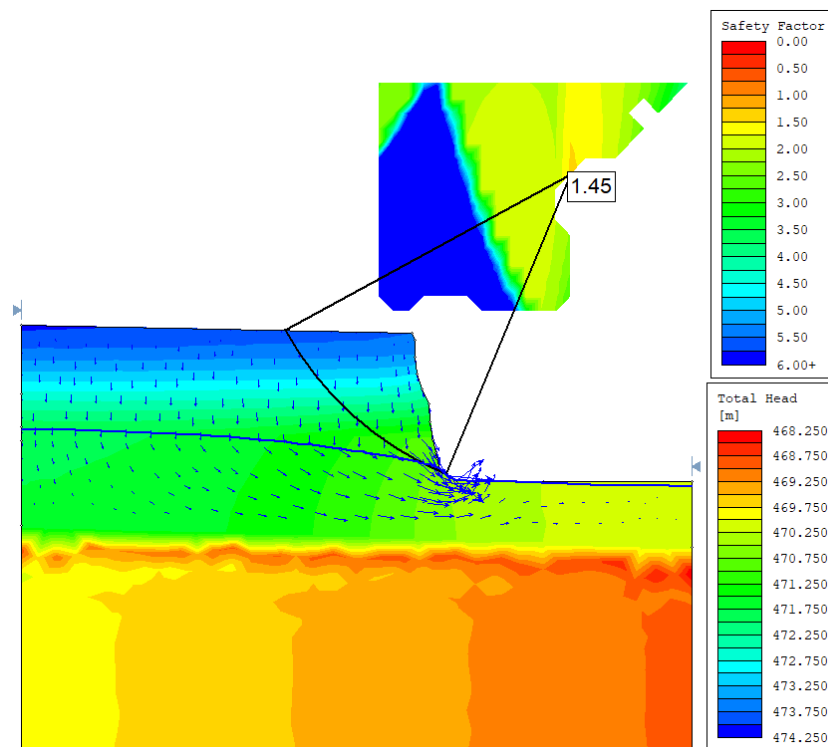


Figura 59 – Resultado da análise de estabilidade do 1º dia do período analisado (15/01/2009), com 30% de infiltração, através do método de Spencer.

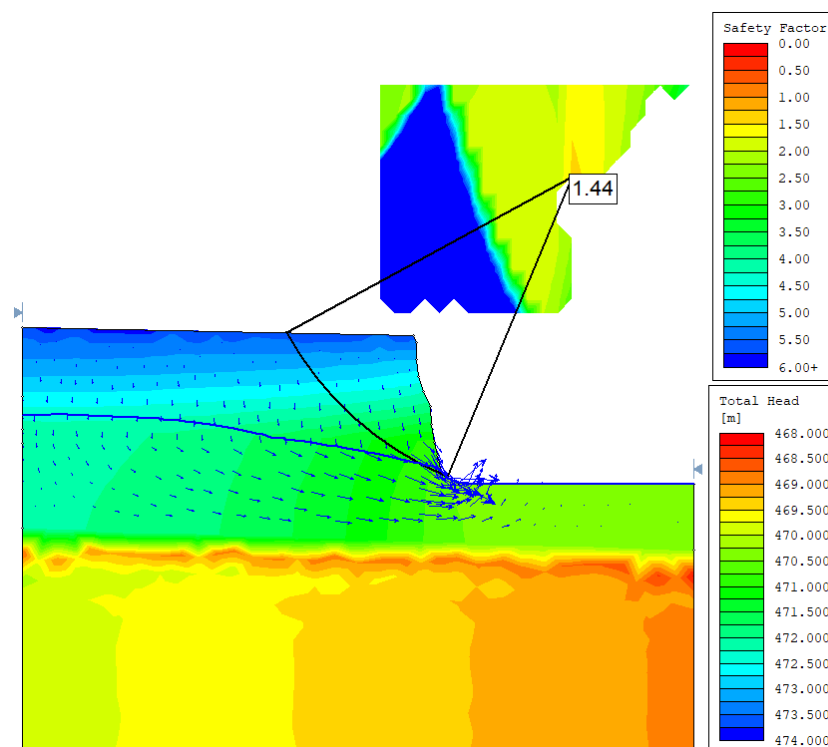


Figura 60 – Resultado da análise de estabilidade do 2º dia do período analisado (16/01/2009), com 30% de infiltração, através do método de Spencer.

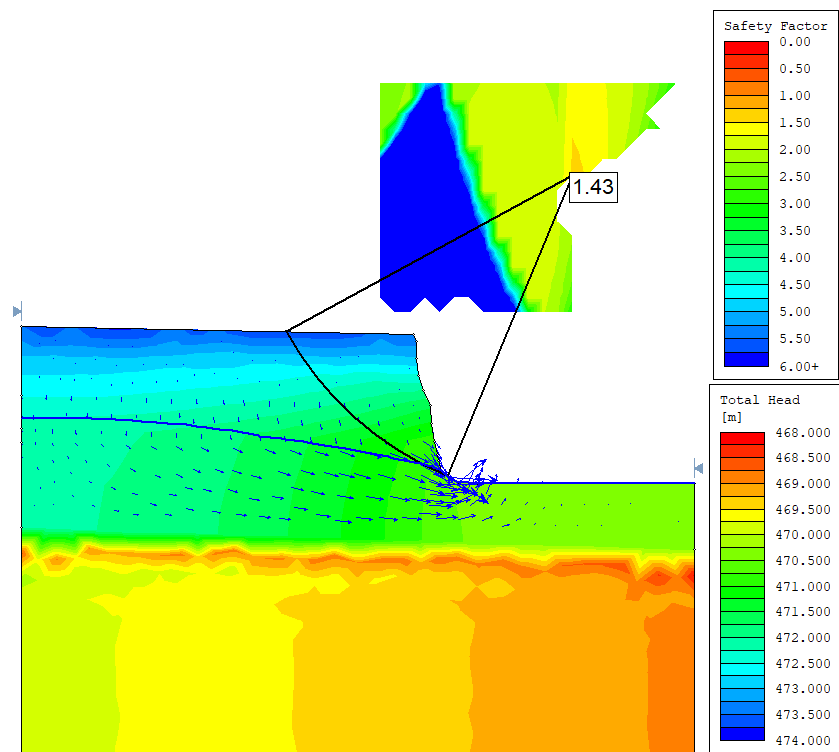


Figura 61 – Resultado da análise de estabilidade do 3º dia do período analisado (17/01/2009), com 30% de infiltração, através do método de Spencer.

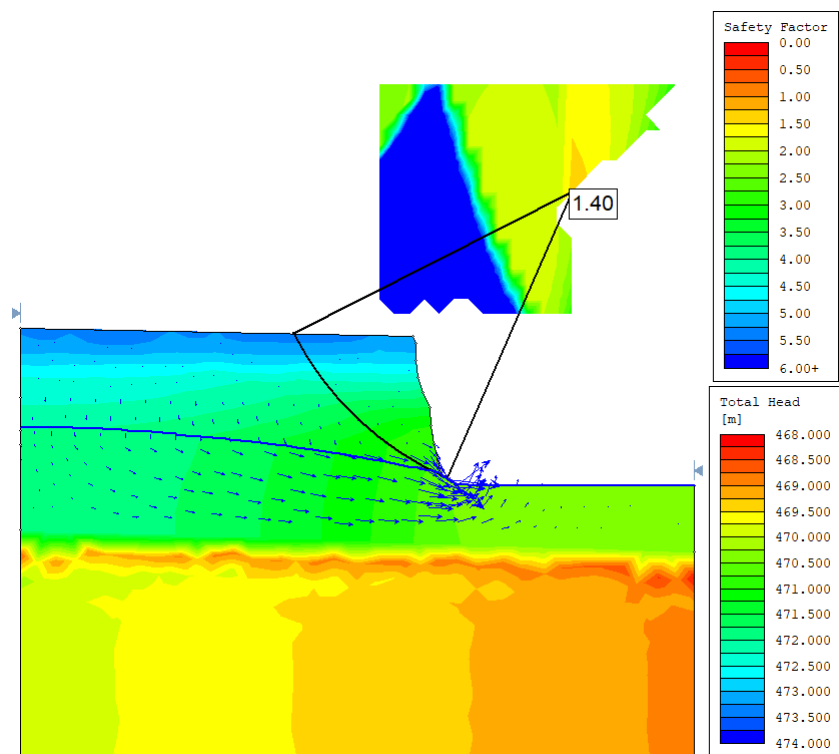


Figura 62 – Resultado da análise de estabilidade do 4º dia do período analisado (18/01/2009), com 30% de infiltração, através do método de Spencer.

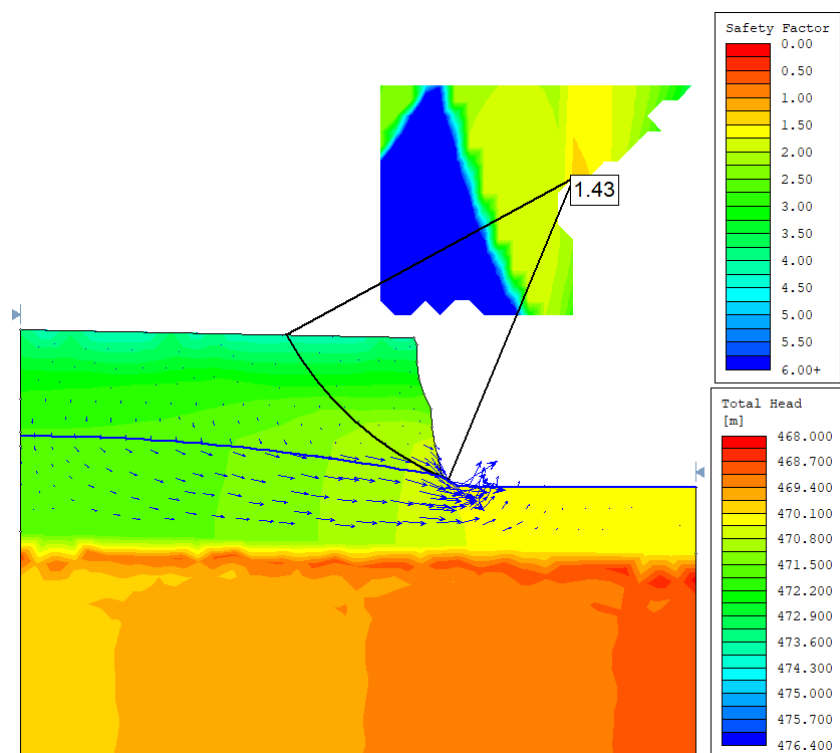


Figura 63 – Resultado da análise de estabilidade do 5º dia do período analisado (19/01/2009), com 30% de infiltração, através do método de Spencer.

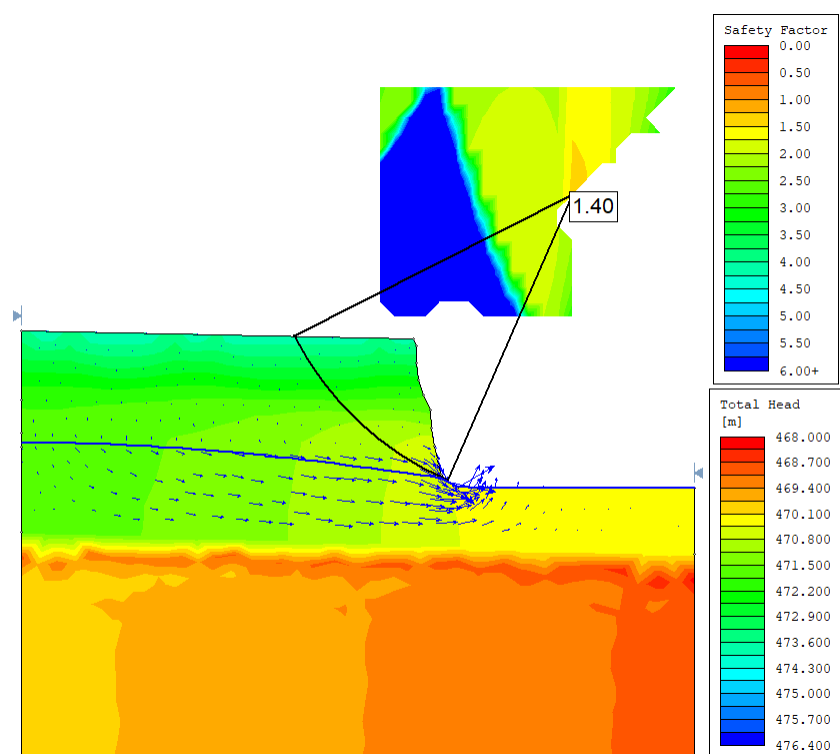


Figura 64 – Resultado da análise de estabilidade do 6º dia do período analisado (20/01/2009), com 30% de infiltração, através do método de Spencer.

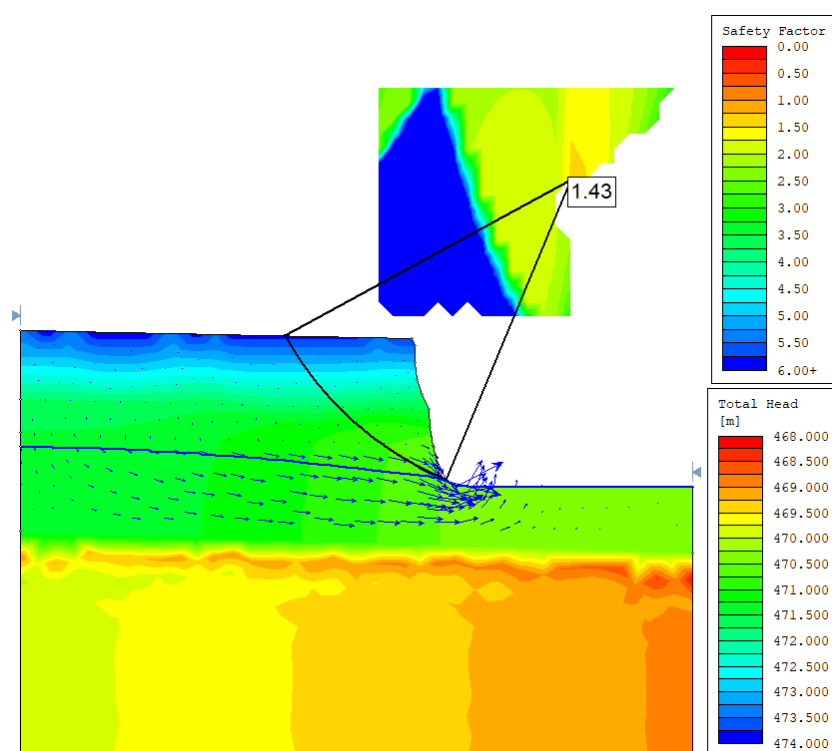


Figura 65 – Resultado da análise de estabilidade do 7º dia do período analisado (21/01/2009), com 30% de infiltração, através do método de Spencer.

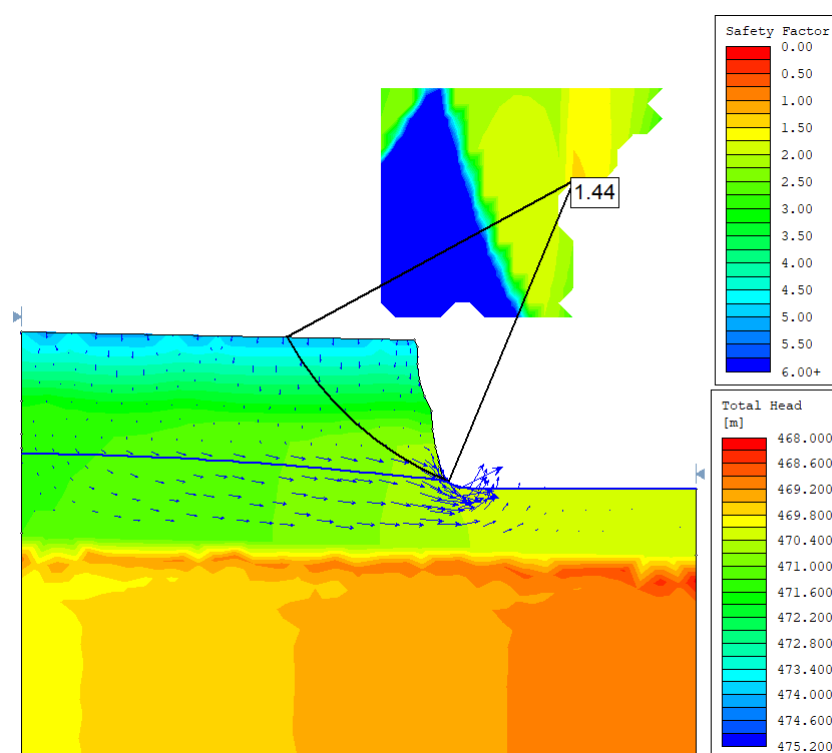


Figura 66 – Resultado da análise de estabilidade do 8º dia do período analisado (22/01/2009), com 30% de infiltração, através do método de Spencer.

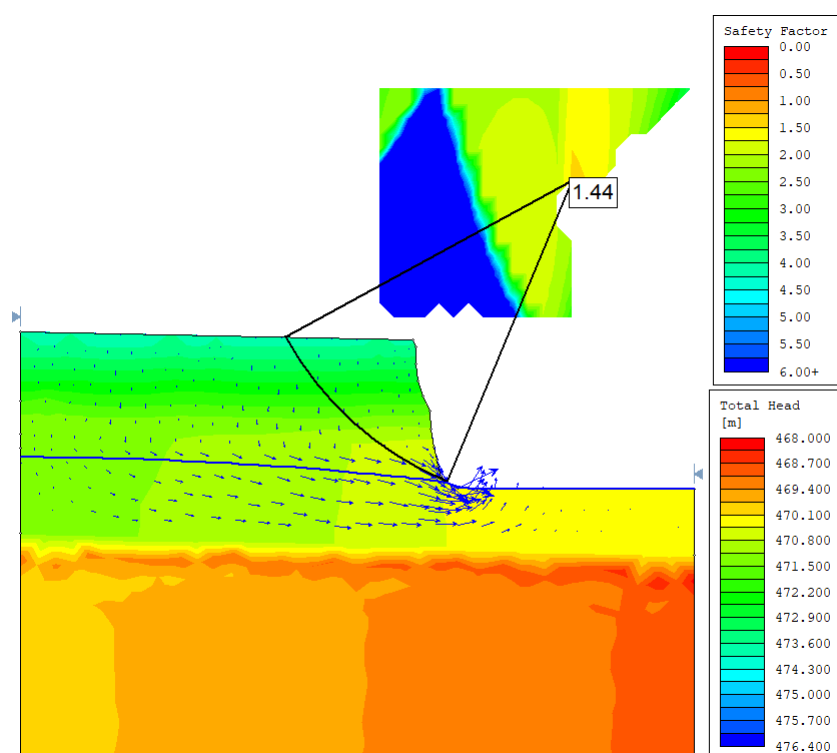


Figura 67 – Resultado da análise de estabilidade do 9º dia do período analisado (23/01/2009), com 30% de infiltração, através do método de Spencer.

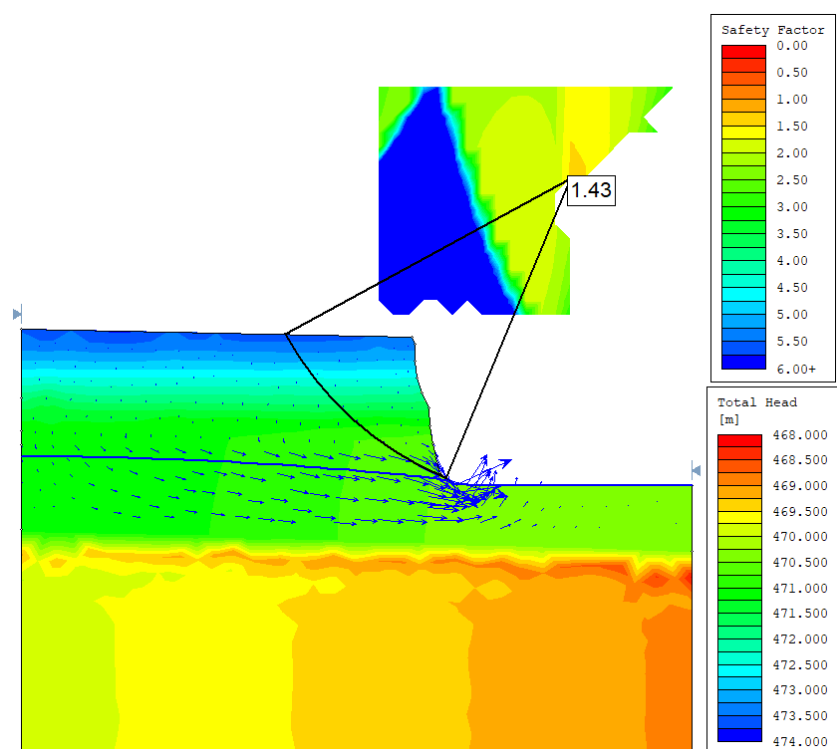


Figura 68 – Resultado da análise de estabilidade do 10º dia do período analisado (24/01/2009), com 30% de infiltração, através do método de Spencer.

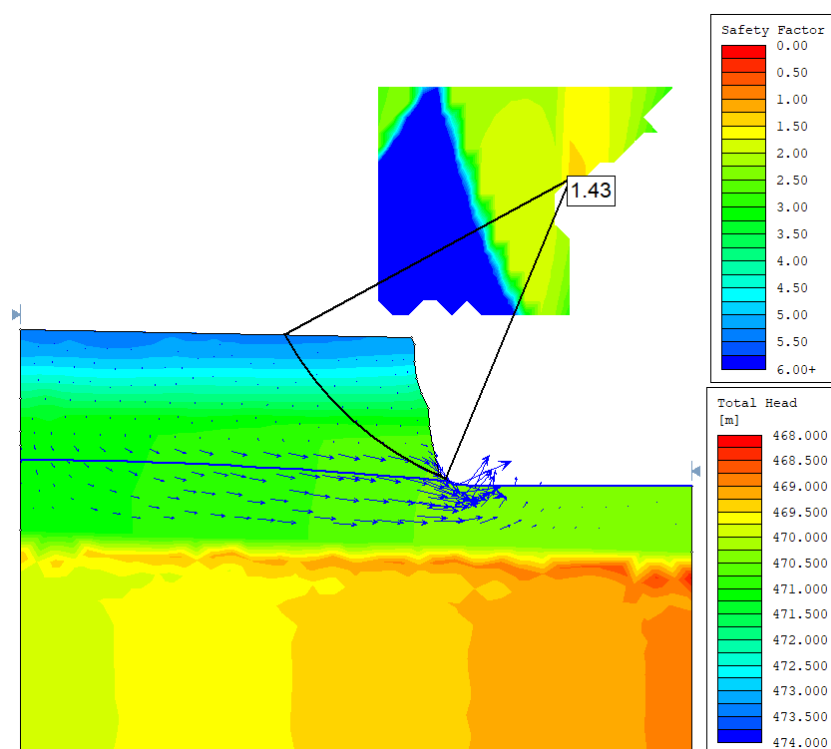


Figura 69 – Resultado da análise de estabilidade do 11º dia do período analisado (25/01/2009), com 30% de infiltração, através do método de Spencer.

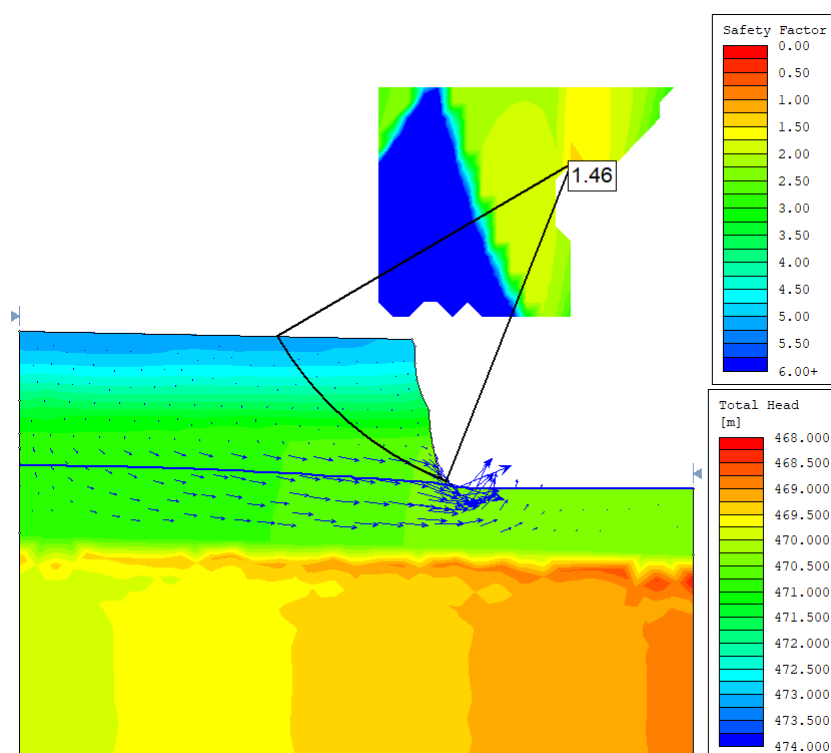


Figura 70 – Resultado da análise de estabilidade do 12º dia do período analisado (26/01/2009), com 30% de infiltração, através do método de Spencer.

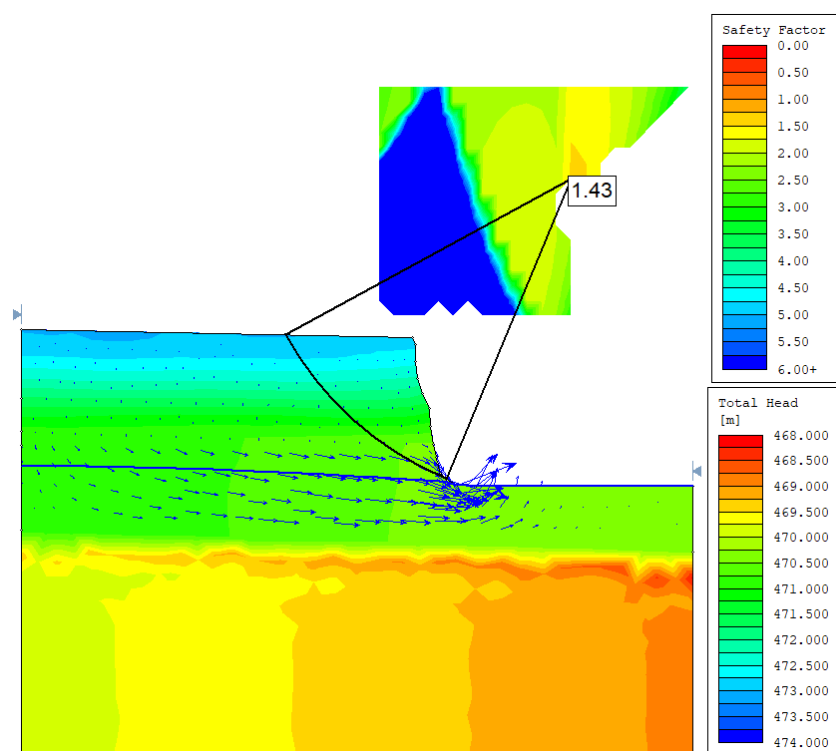


Figura 71 – Resultado da análise de estabilidade do 13º dia do período analisado (27/01/2009), com 30% de infiltração, através do método de Spencer.

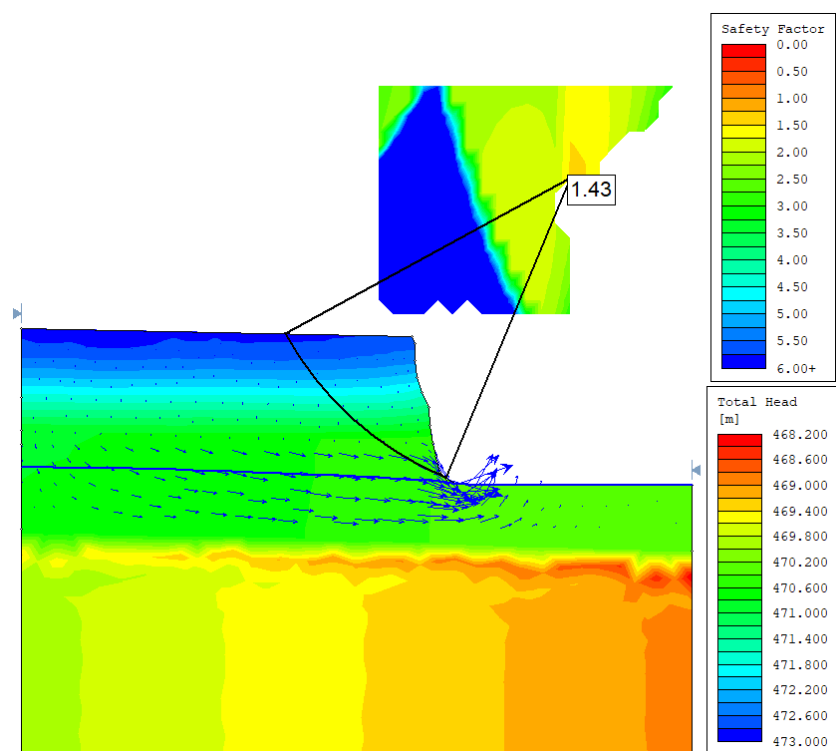


Figura 72 – Resultado da análise de estabilidade do 14º dia do período analisado (28/01/2009), com 30% de infiltração, através do método de Spencer.

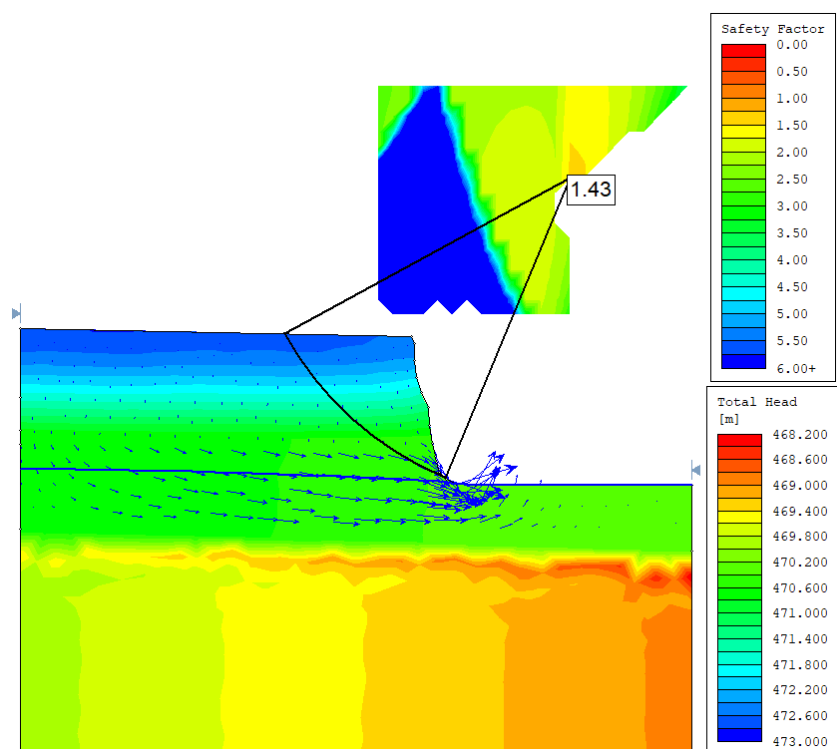


Figura 73 – Resultado da análise de estabilidade do 15º dia do período analisado (29/01/2009), com 30% de infiltração, através do método de Spencer.

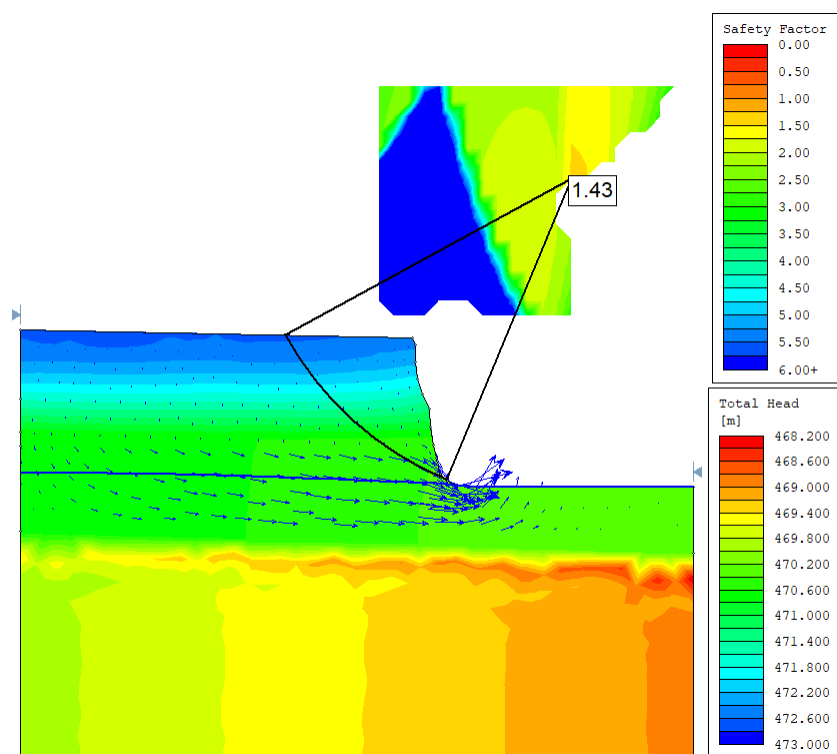


Figura 74 – Resultado da análise de estabilidade do 16º dia do período analisado (30/01/2009), com 30% de infiltração, através do método de Spencer.

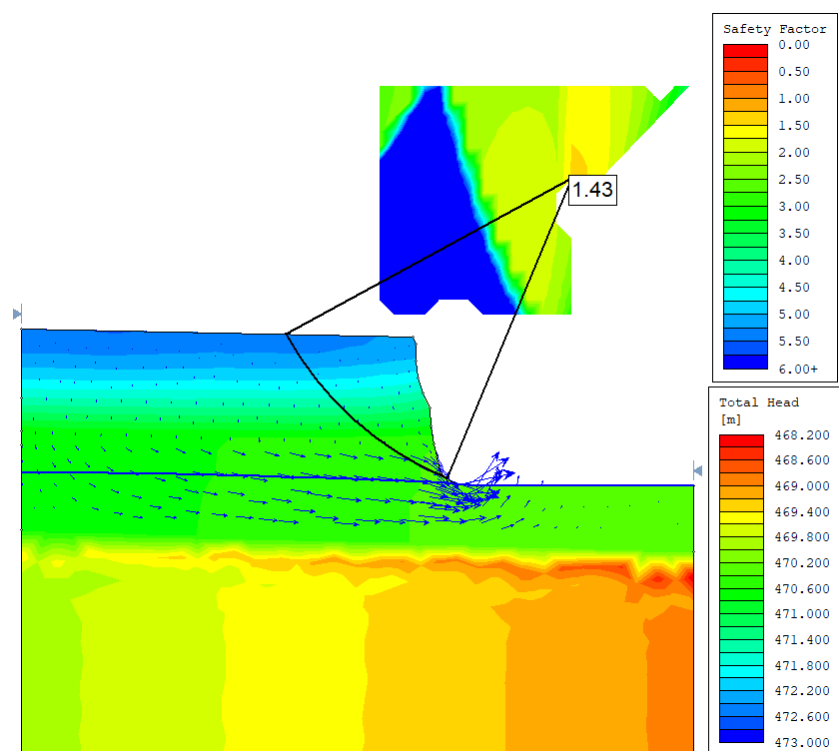


Figura 75 – Resultado da análise de estabilidade do 17º dia do período analisado (31/01/2009), com 30% de infiltração, através do método de Spencer.

ANEXO C

Resultados da análise de estabilidade com fluxo transiente, considerando infiltração de 40% do total precipitado.

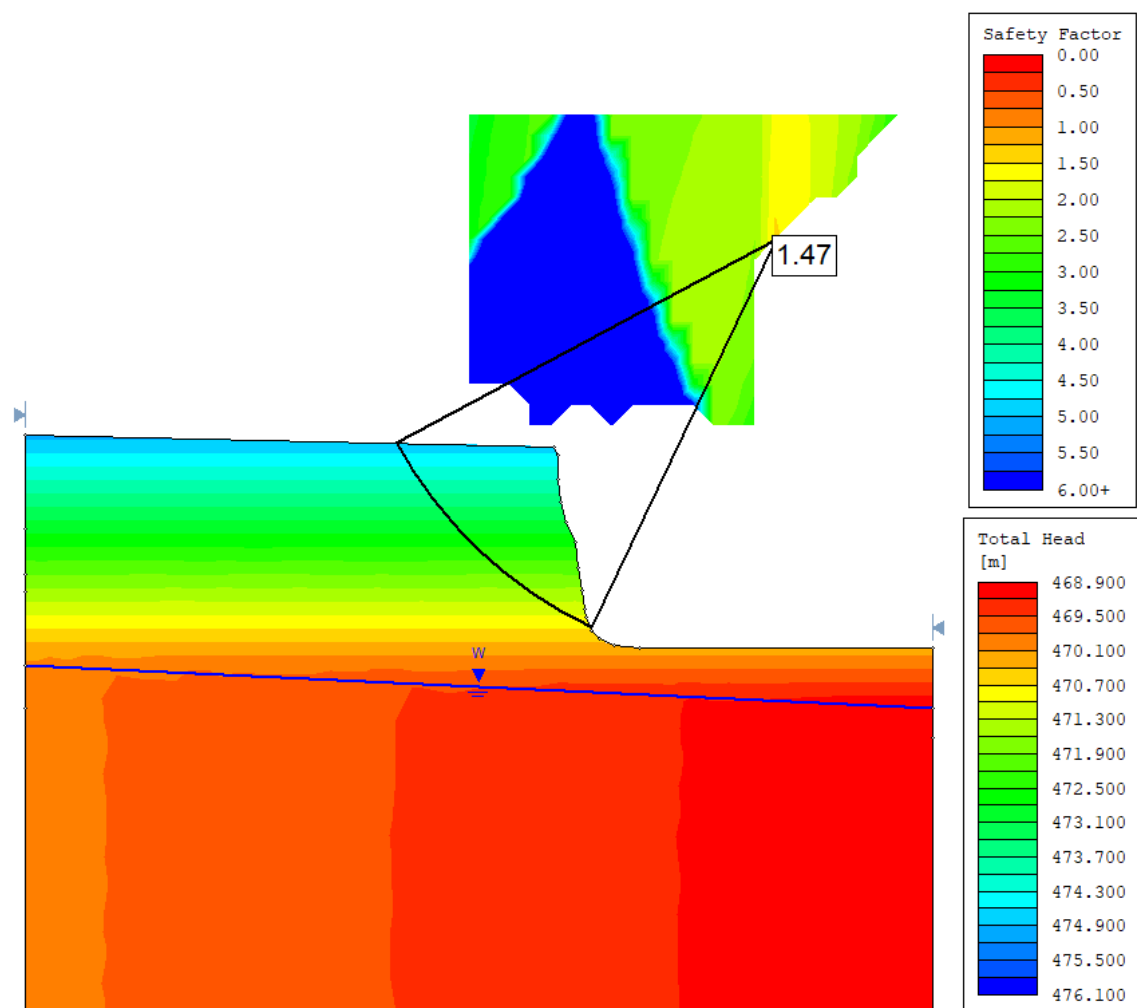


Figura 76 – Resultado da análise de estabilidade do dia inicial (14/01/2009), anterior ao período de precipitação analisado, com 40% de infiltração, através do método de Spencer.

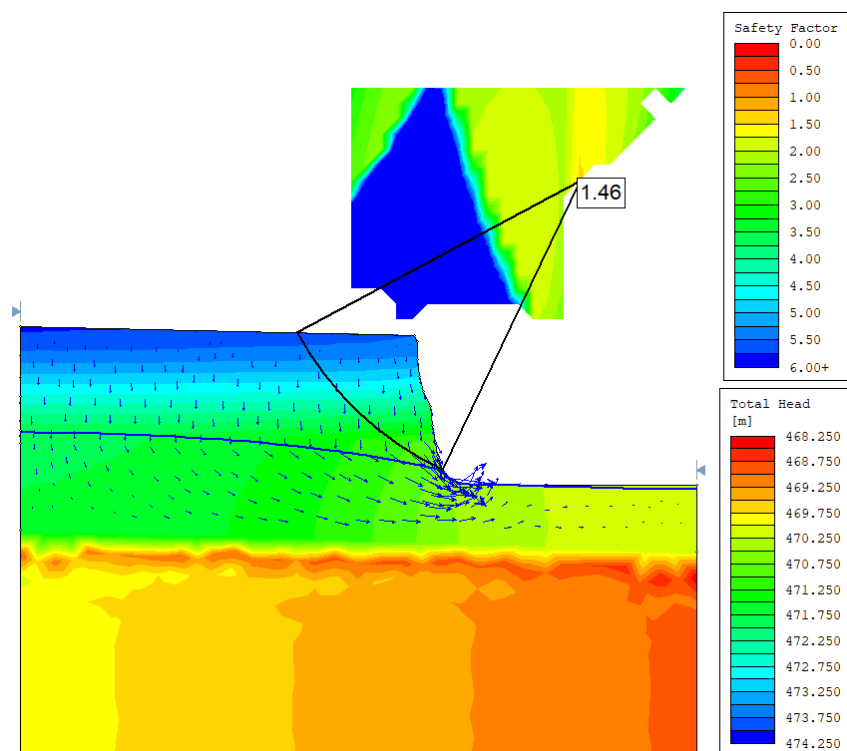


Figura 77 – Resultado da análise de estabilidade do 1º dia do período analisado (15/01/2009), com 40% de infiltração, através do método de Spencer.

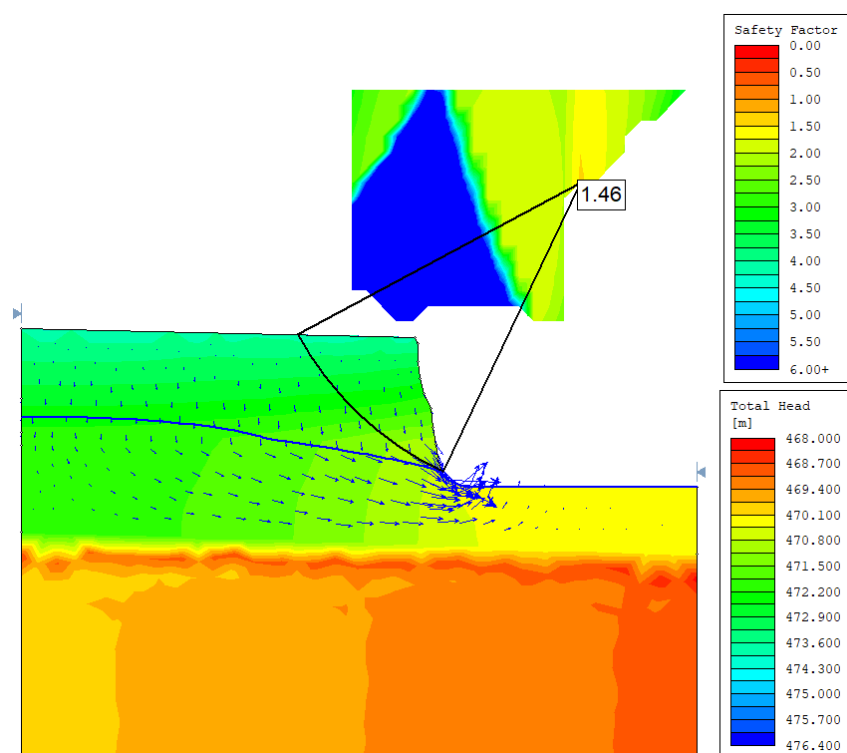


Figura 78 – Resultado da análise de estabilidade do 2º dia do período analisado (16/01/2009), com 40% de infiltração, através do método de Spencer.

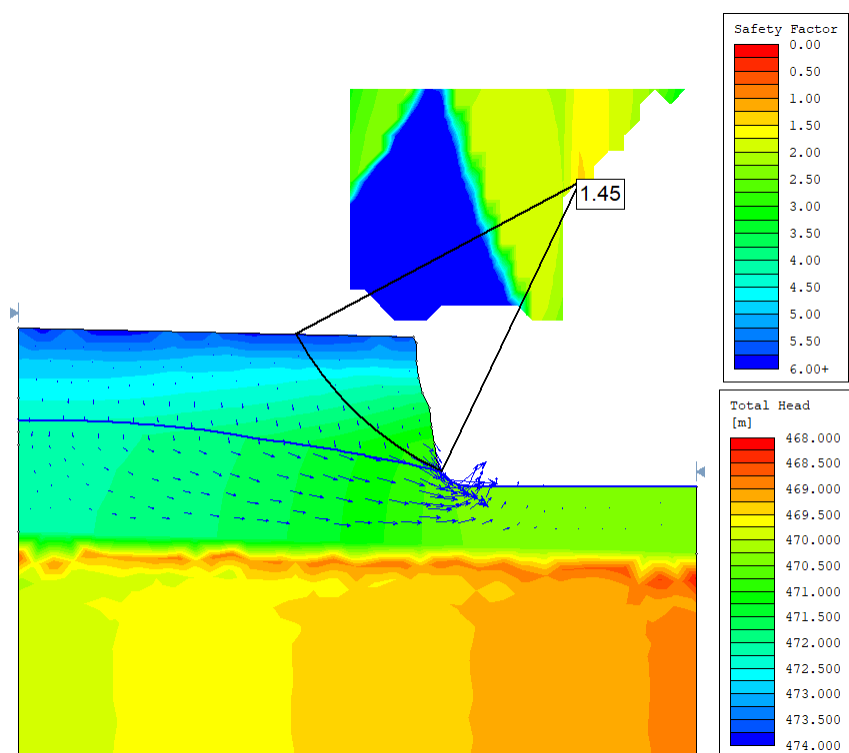


Figura 79 – Resultado da análise de estabilidade do 3º dia do período analisado (17/01/2009), com 40% de infiltração, através do método de Spencer.

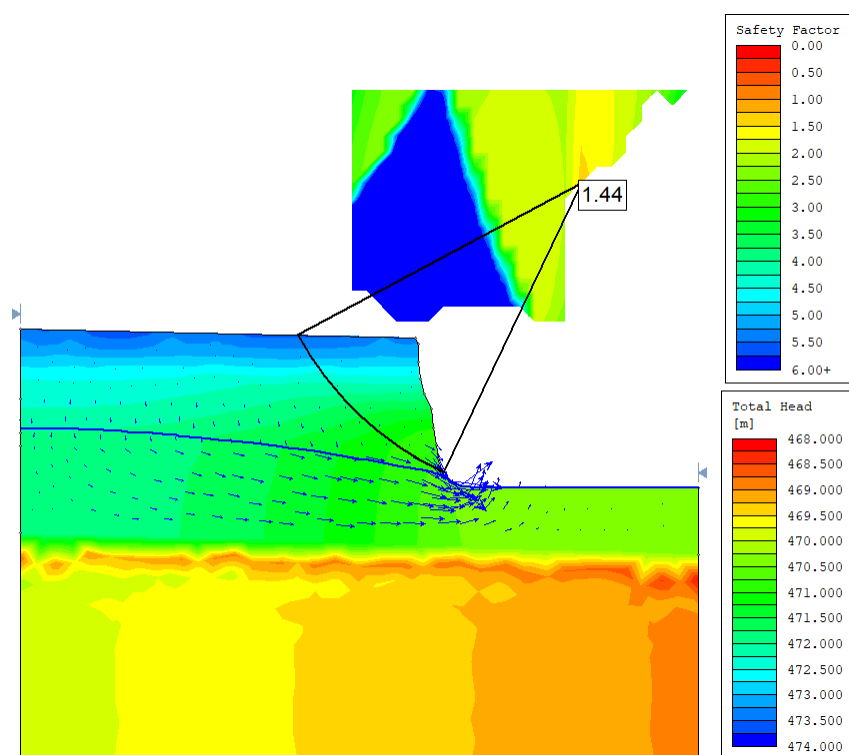


Figura 80 – Resultado da análise de estabilidade do 4º dia do período analisado (18/01/2009), com 40% de infiltração, através do método de Spencer.

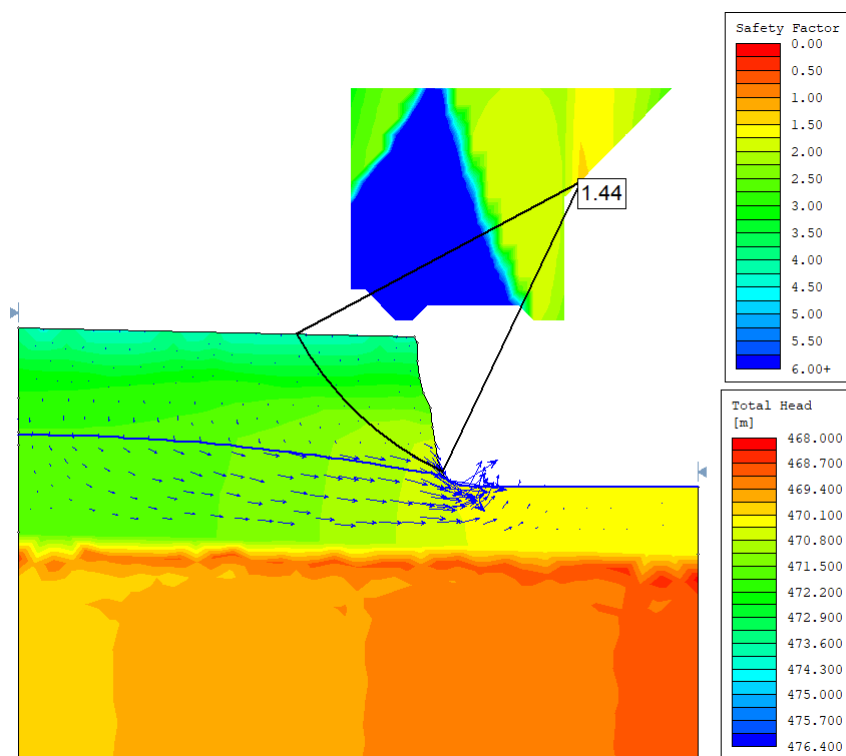


Figura 81 – Resultado da análise de estabilidade do 5º dia do período analisado (19/01/2009), com 40% de infiltração, através do método de Spencer.

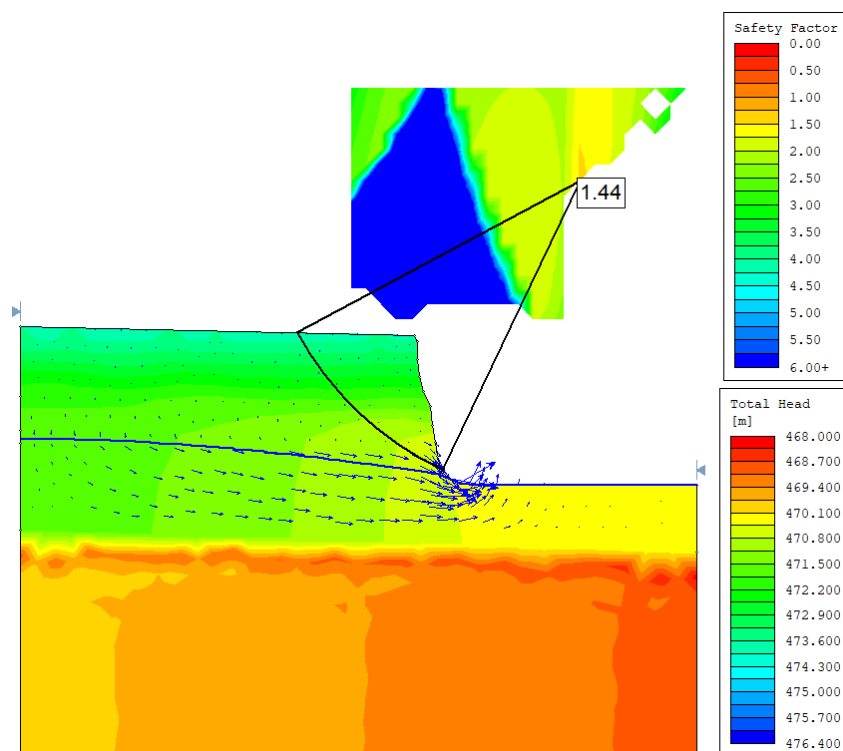


Figura 82 – Resultado da análise de estabilidade do 6º dia do período analisado (20/01/2009), com 40% de infiltração, através do método de Spencer.

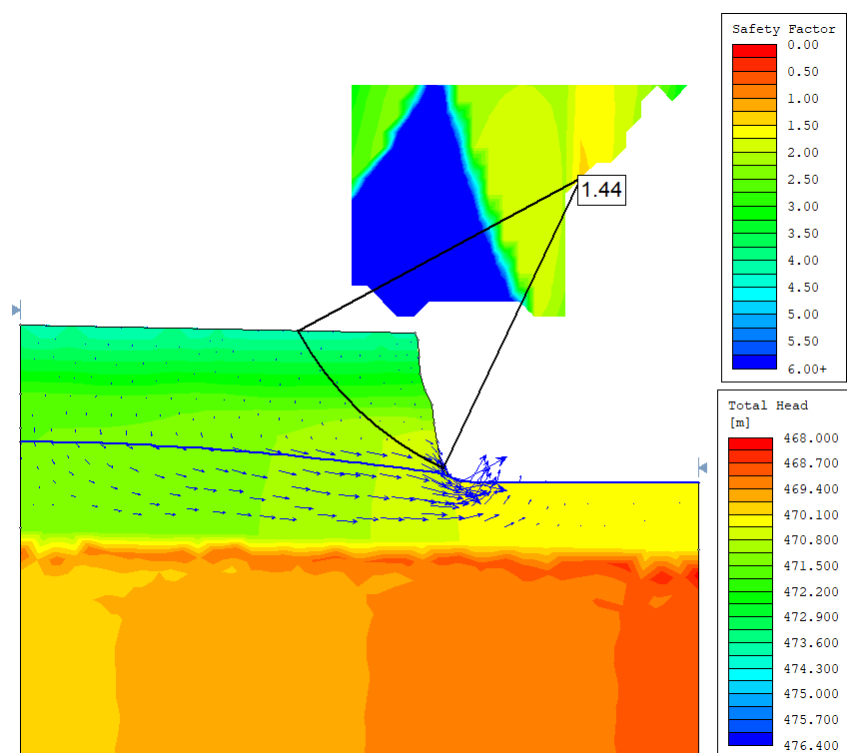


Figura 83 – Resultado da análise de estabilidade do 7º dia do período analisado (21/01/2009), com 40% de infiltração, através do método de Spencer.

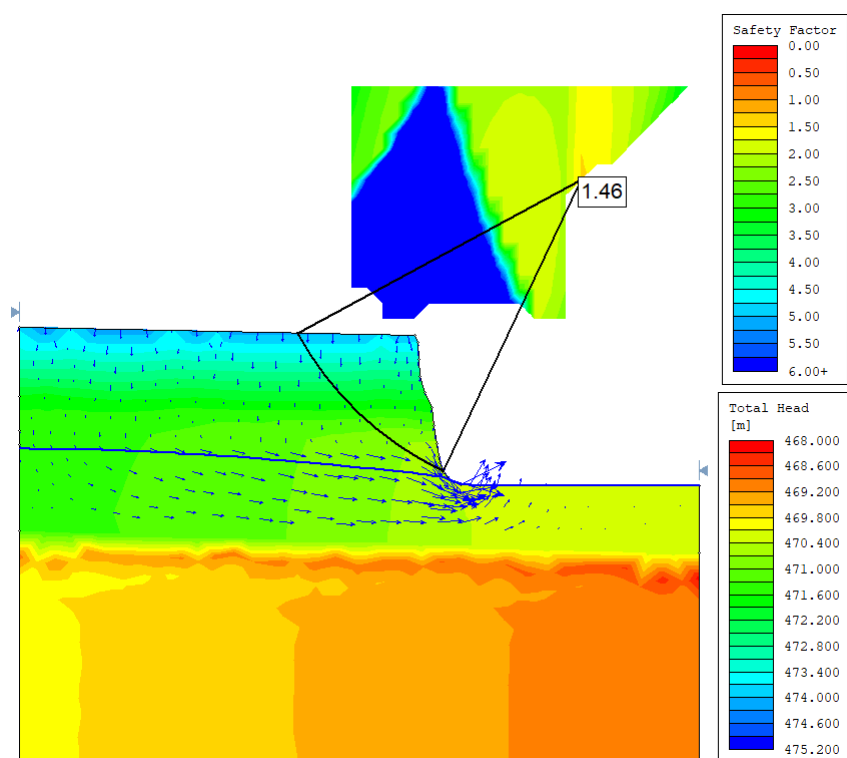


Figura 84 – Resultado da análise de estabilidade do 8º dia do período analisado (22/01/2009), com 40% de infiltração, através do método de Spencer.

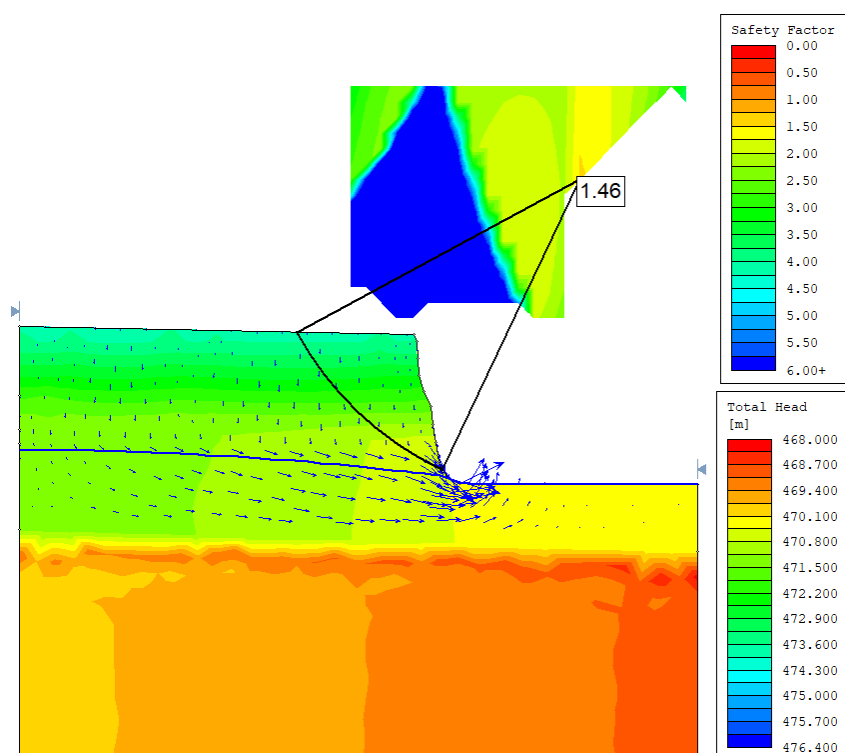


Figura 85 – Resultado da análise de estabilidade do 9º dia do período analisado (23/01/2009), com 40% de infiltração, através do método de Spencer.

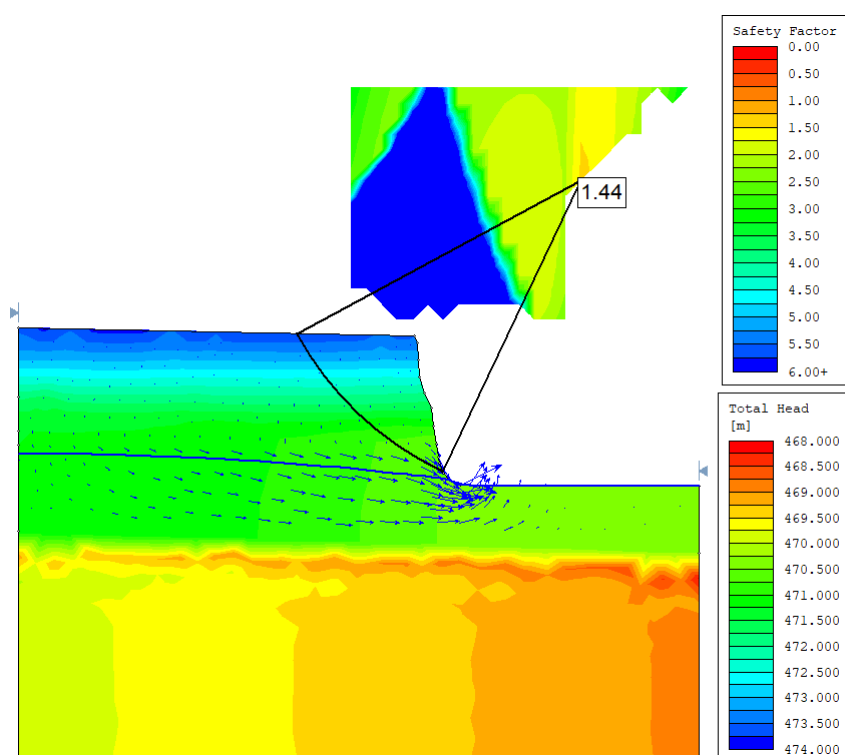


Figura 86 – Resultado da análise de estabilidade do 10º dia do período analisado (24/01/2009), com 40% de infiltração, através do método de Spencer.

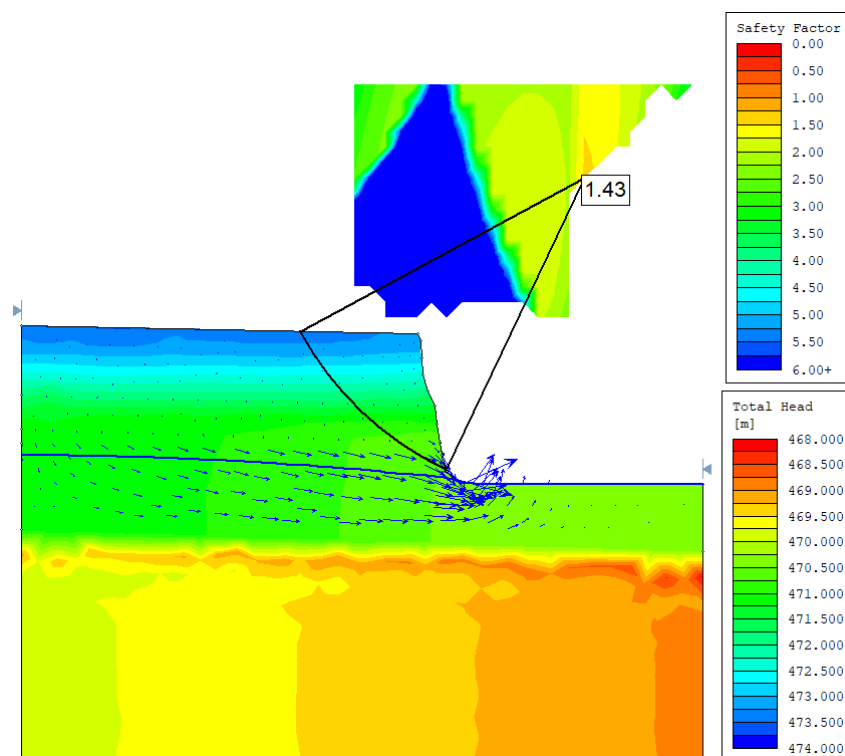


Figura 87 – Resultado da análise de estabilidade do 11º dia do período analisado (25/01/2009), com 40% de infiltração, através do método de Spencer.

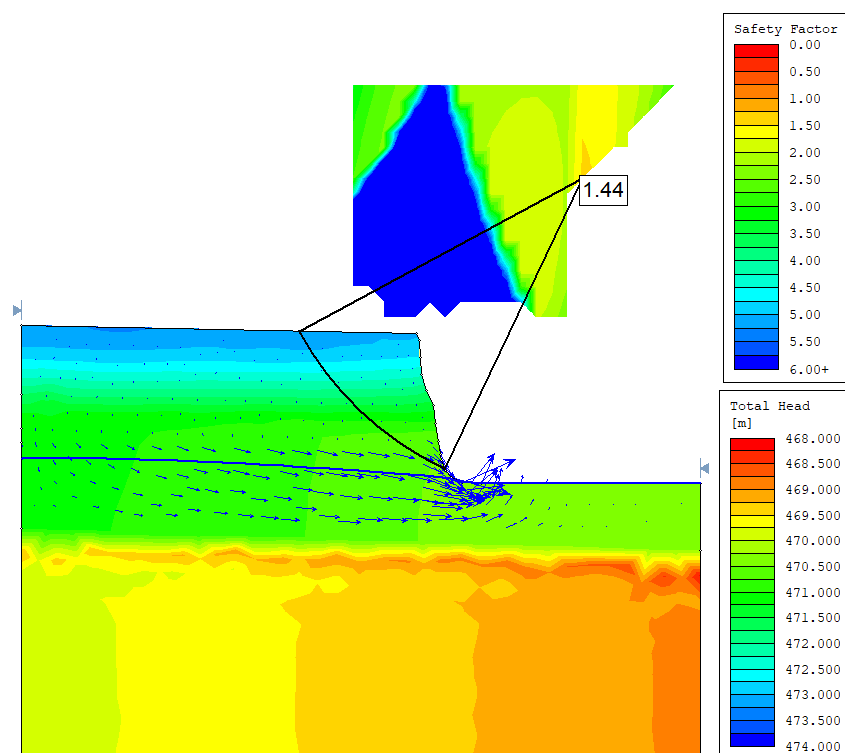


Figura 88 – Resultado da análise de estabilidade do 12º dia do período analisado (26/01/2009), com 40% de infiltração, através do método de Spencer.

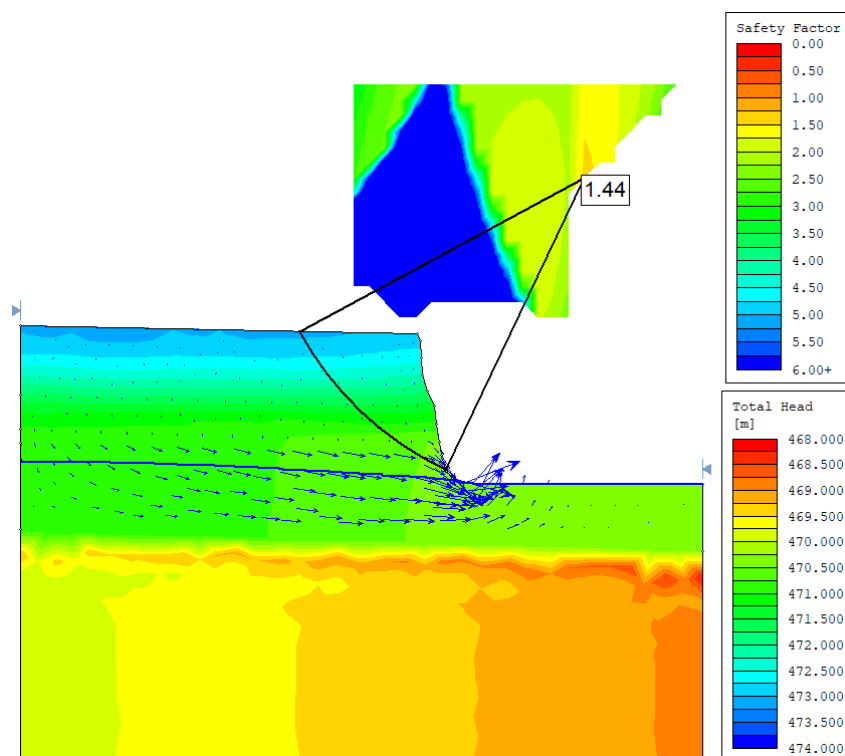


Figura 89 – Resultado da análise de estabilidade do 13º dia do período analisado (27/01/2009), com 40% de infiltração, através do método de Spencer.

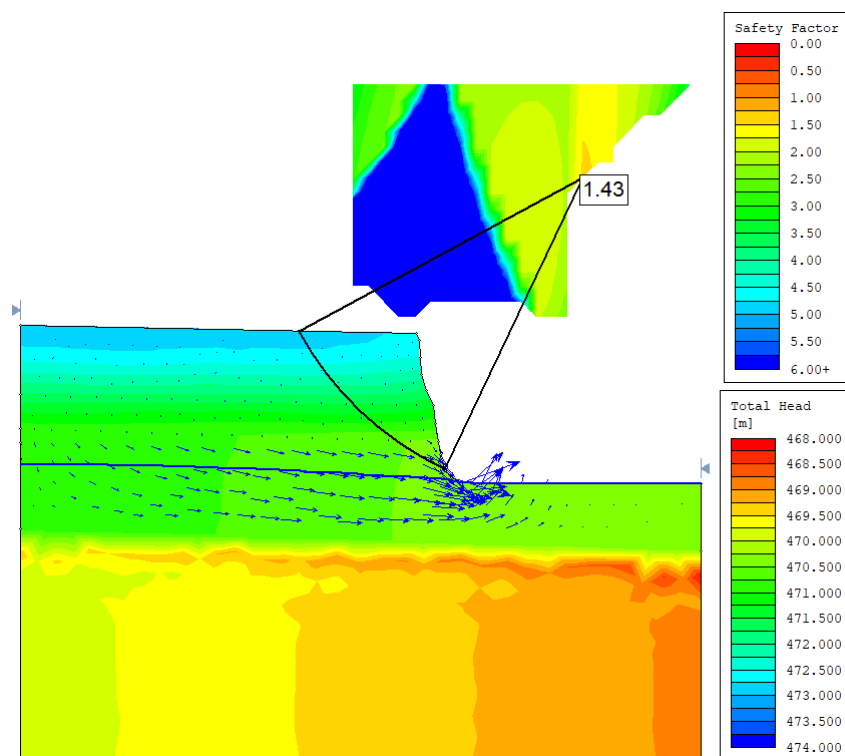


Figura 90 – Resultado da análise de estabilidade do 14º dia do período analisado (28/01/2009), com 40% de infiltração, através do método de Spencer.

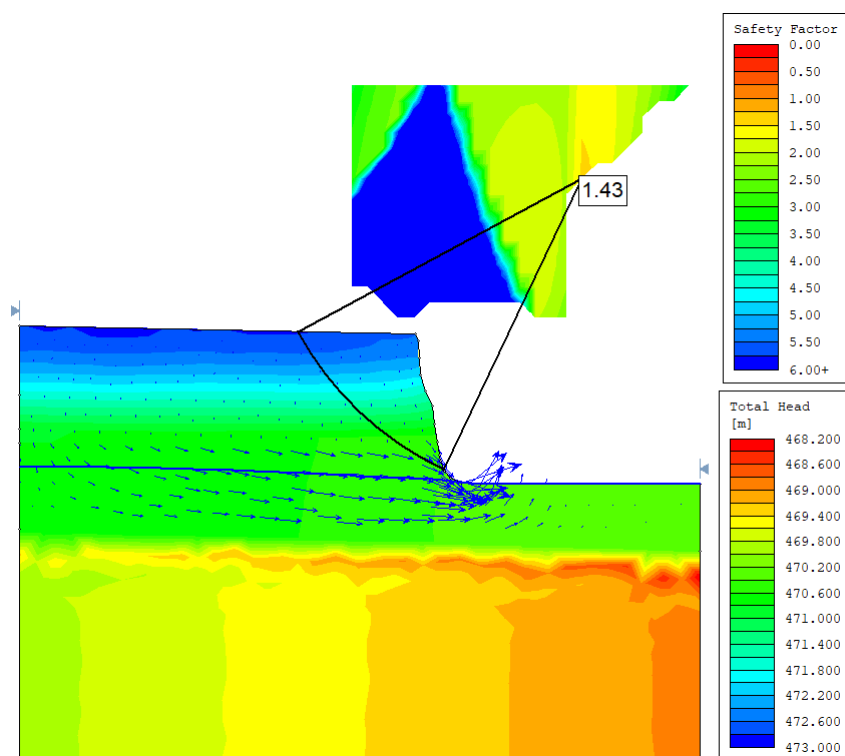


Figura 91 – Resultado da análise de estabilidade do 15º dia do período analisado (29/01/2009), com 40% de infiltração, através do método de Spencer.

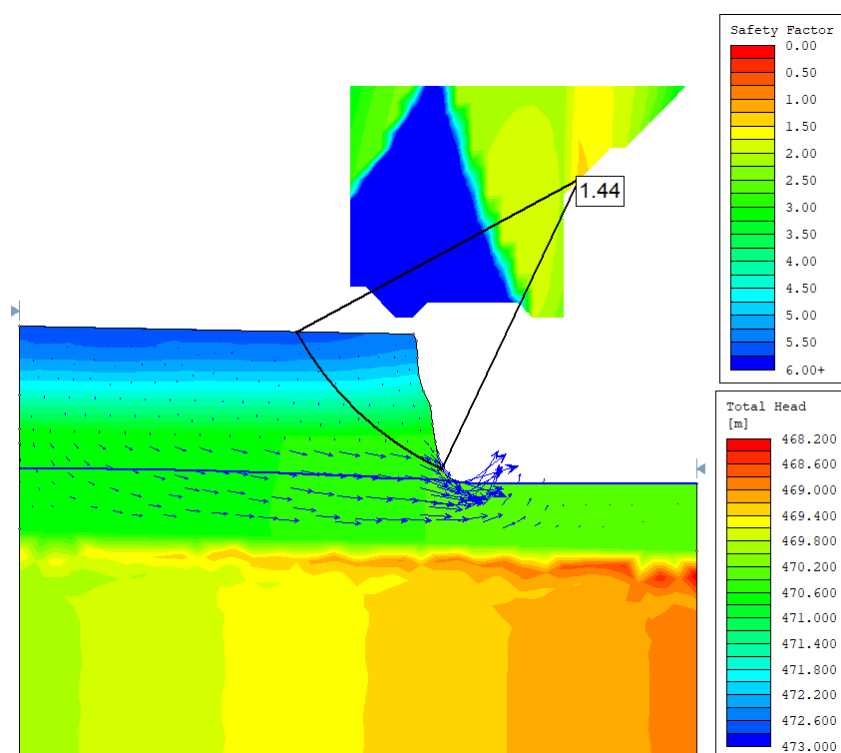


Figura 92 – Resultado da análise de estabilidade do 16º dia do período analisado (30/01/2009), com 40% de infiltração, através do método de Spencer.

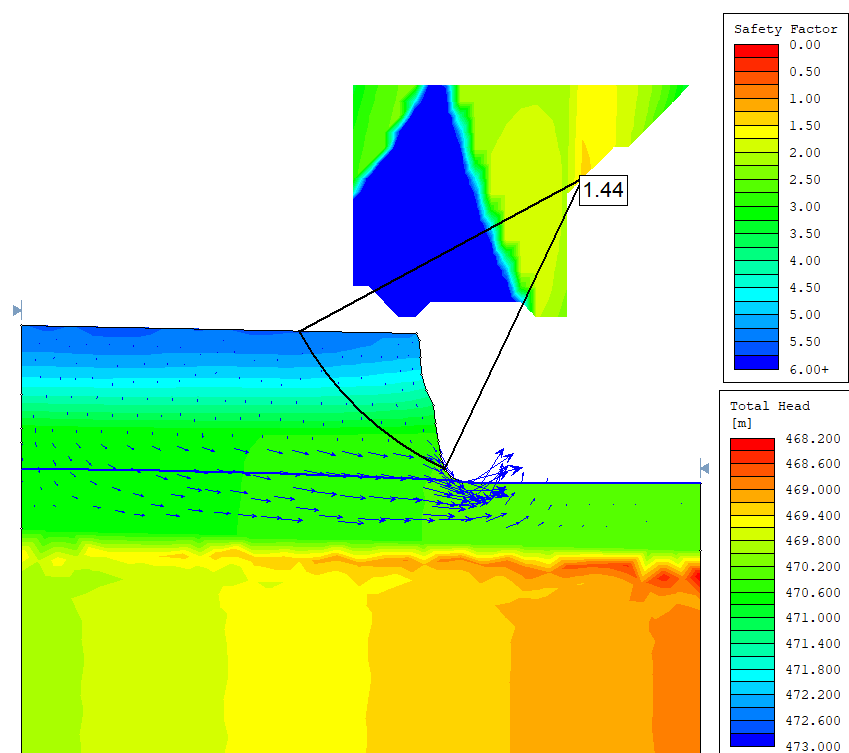


Figura 93 – Resultado da análise de estabilidade do 17º dia do período analisado (31/01/2009), com 40% de infiltração, através do método de Spencer.

ANEXO D

Resultados da análise de estabilidade com fluxo transiente, considerando infiltração de 50% do total precipitado.

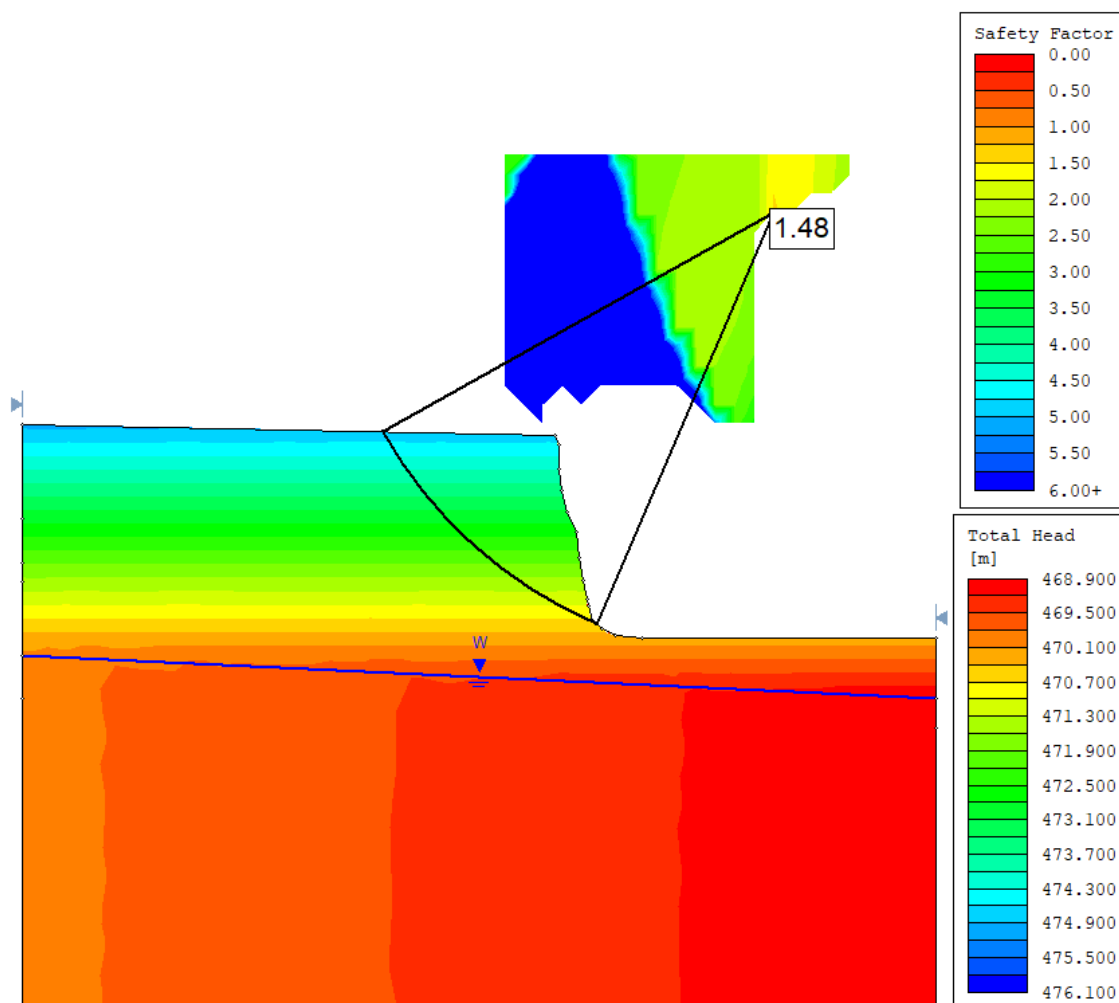


Figura 94 – Resultado da análise de estabilidade do dia inicial (14/01/2009), anterior ao período de precipitação analisado, com 50% de infiltração, através do método de Spencer.

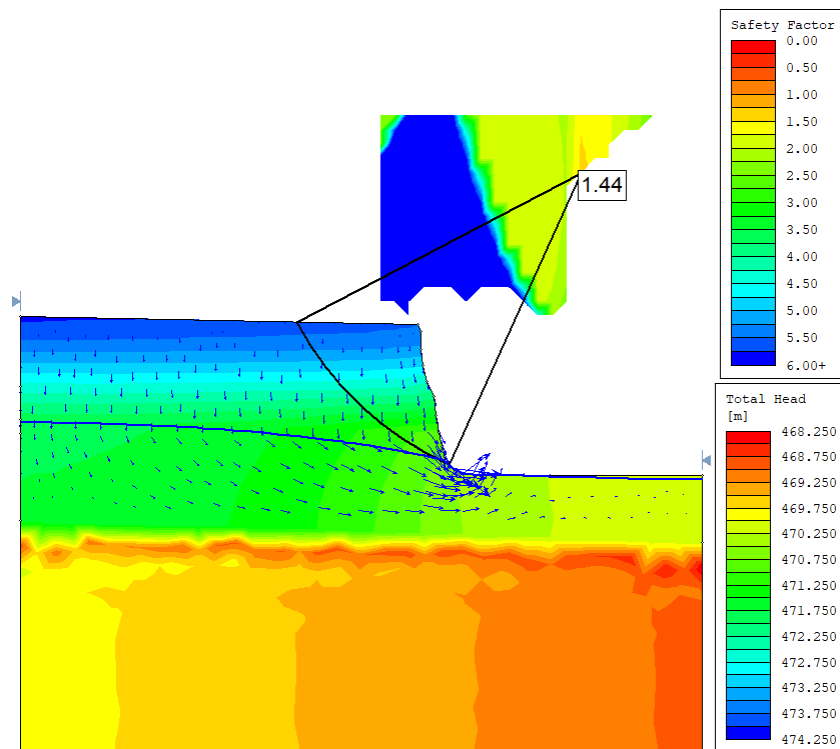


Figura 95 – Resultado da análise de estabilidade do 1º dia do período analisado (15/01/2009), com 50% de infiltração, através do método de Spencer.

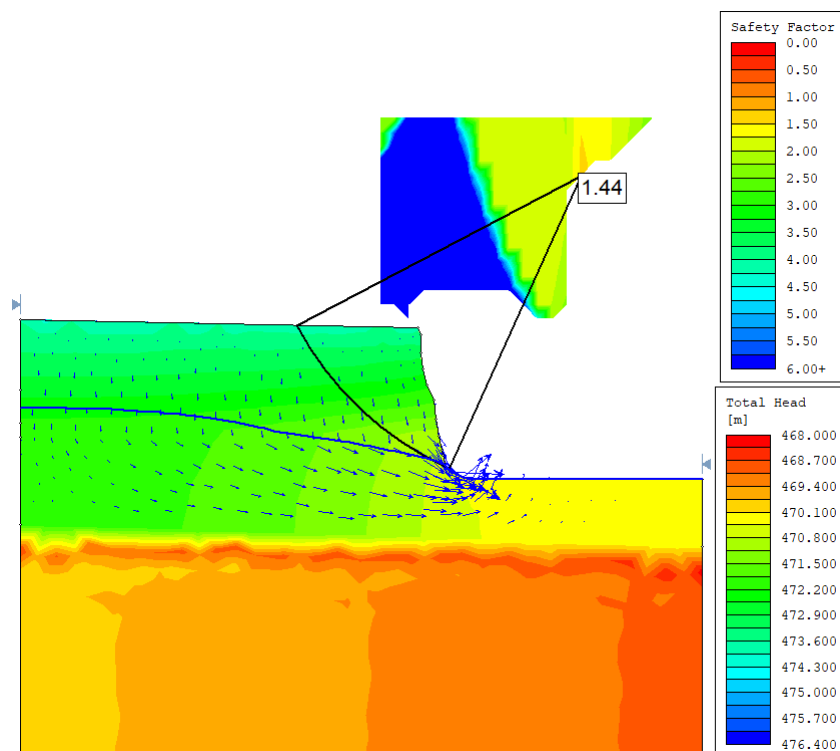


Figura 96 – Resultado da análise de estabilidade do 2º dia do período analisado (16/01/2009), com 50% de infiltração, através do método de Spencer.

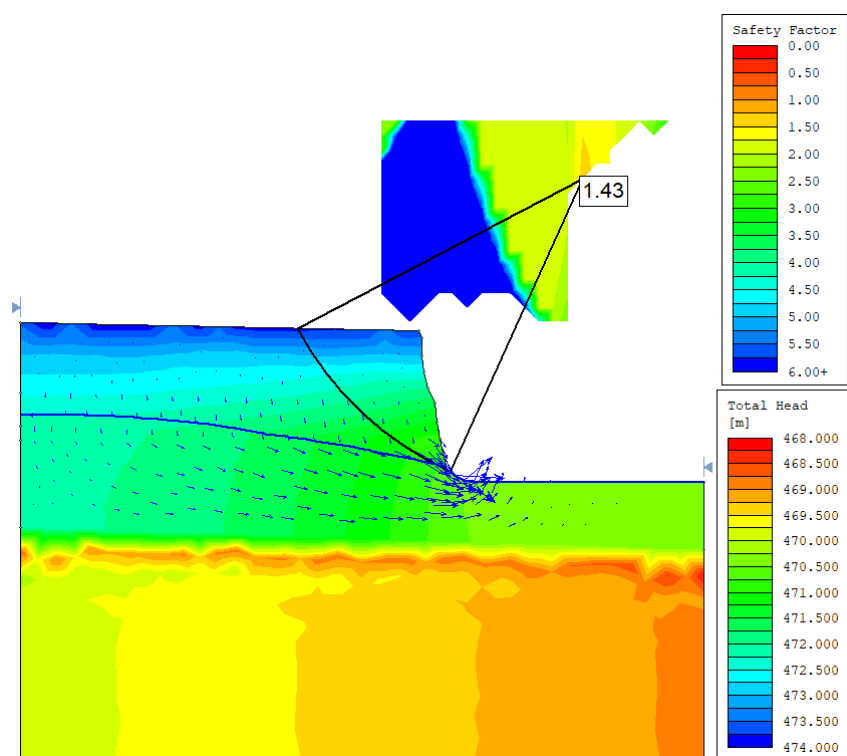


Figura 97 – Resultado da análise de estabilidade do 3º dia do período analisado (17/01/2009), com 50% de infiltração, através do método de Spencer.

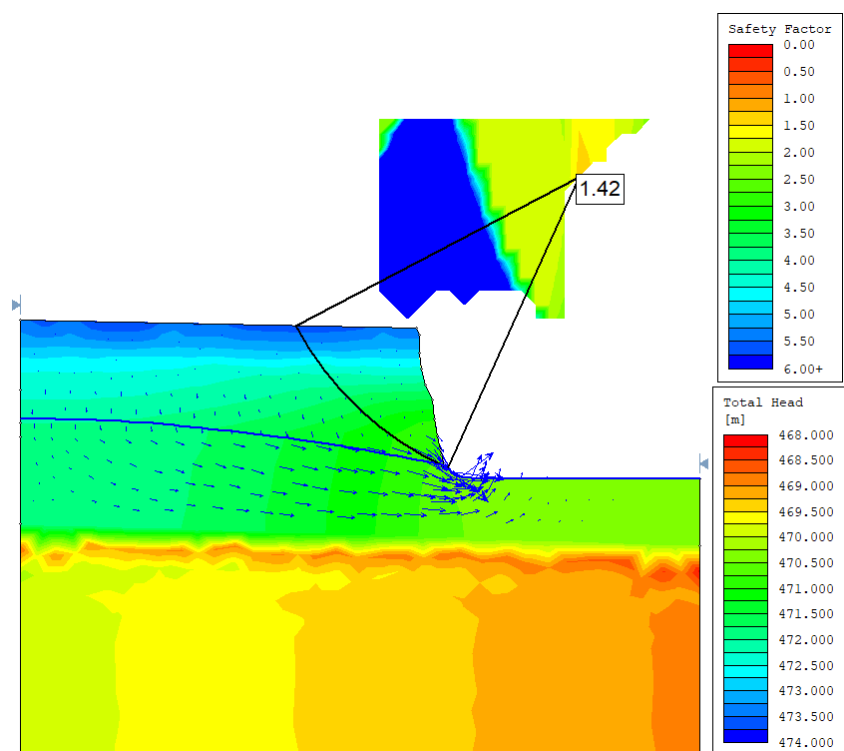


Figura 98 – Resultado da análise de estabilidade do 4º dia do período analisado (18/01/2009), com 50% de infiltração, através do método de Spencer.

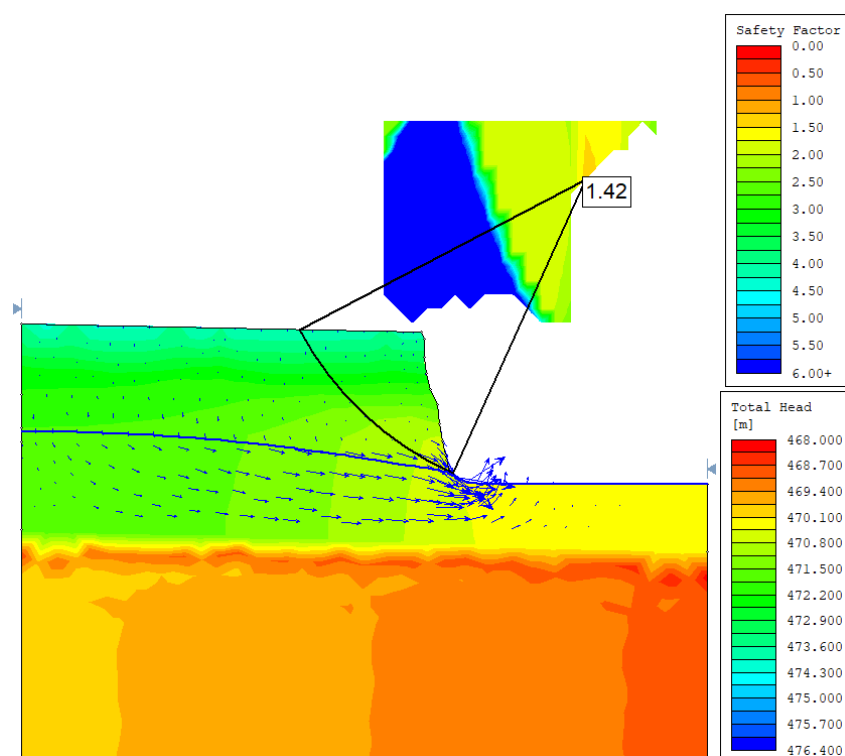


Figura 99 – Resultado da análise de estabilidade do 5º dia do período analisado (19/01/2009), com 50% de infiltração, através do método de Spencer.

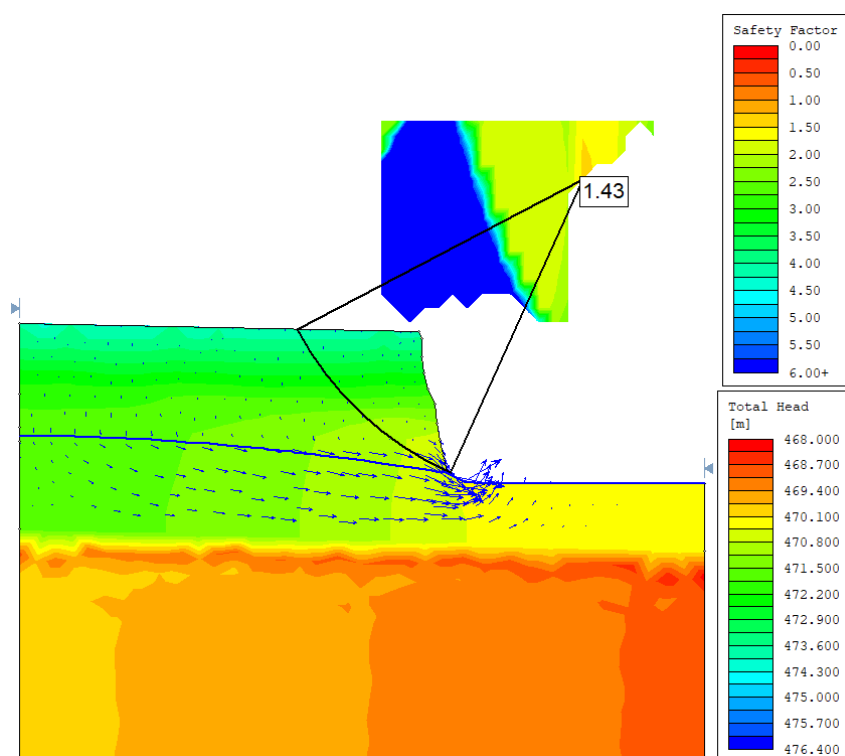


Figura 100 – Resultado da análise de estabilidade do 6º dia do período analisado (20/01/2009), com 50% de infiltração, através do método de Spencer.

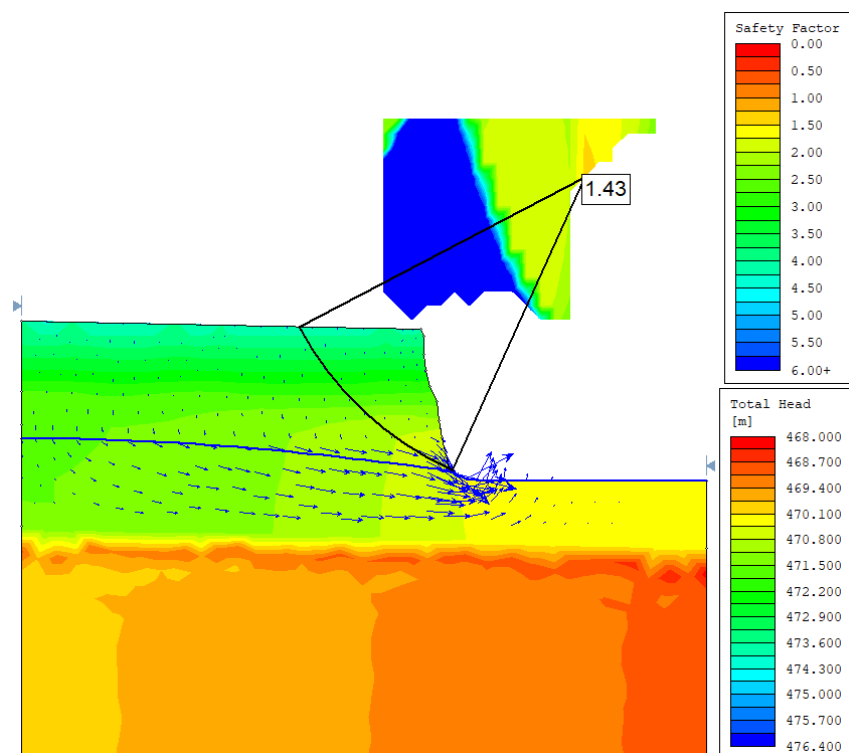


Figura 101 – Resultado da análise de estabilidade do 7º dia do período analisado (21/01/2009), com 50% de infiltração, através do método de Spencer.

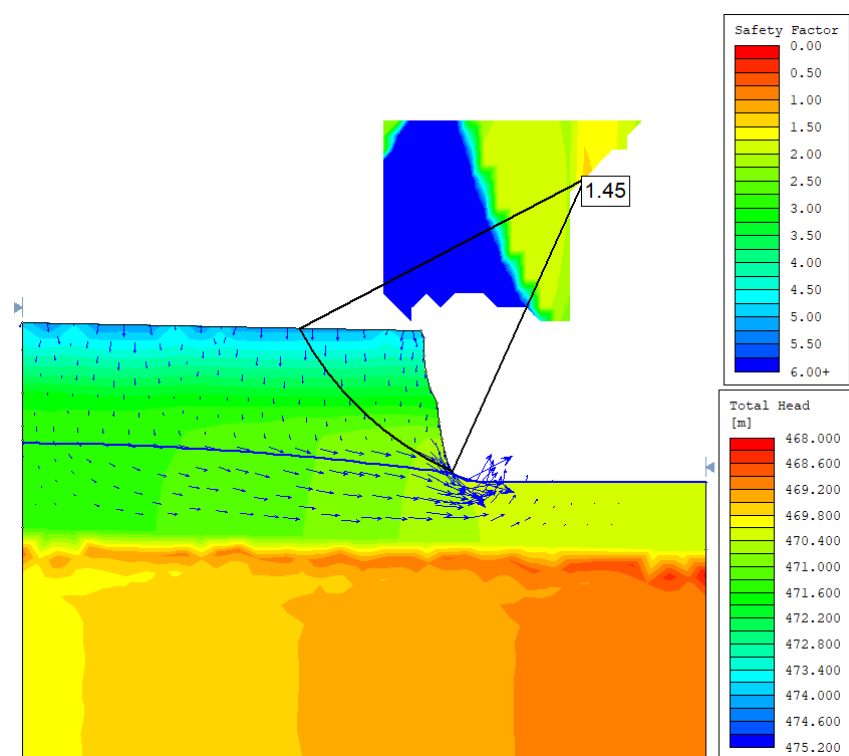


Figura 102 – Resultado da análise de estabilidade do 8º dia do período analisado (22/01/2009), com 50% de infiltração, através do método de Spencer.

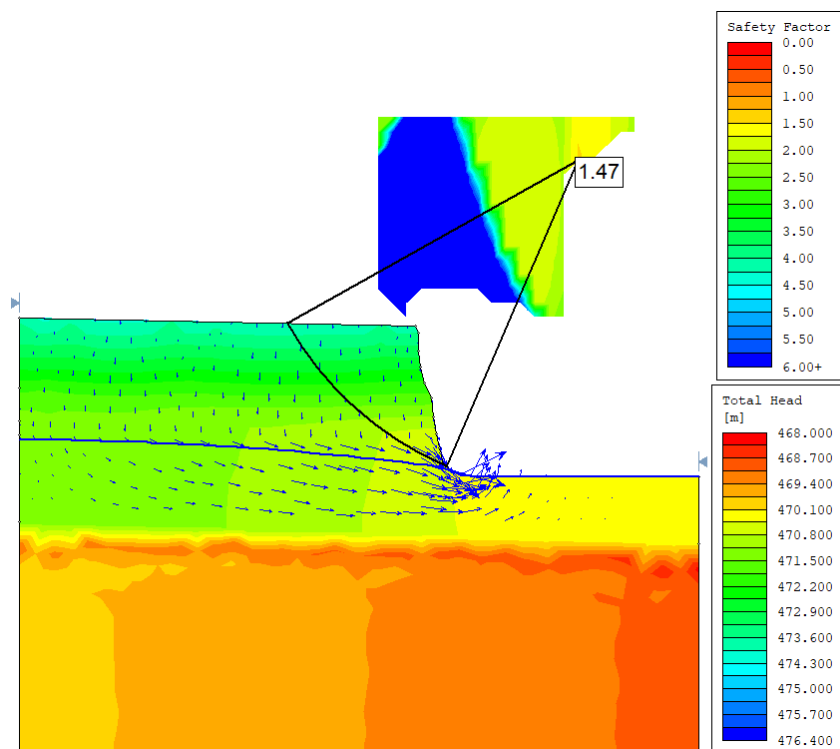


Figura 103 – Resultado da análise de estabilidade do 9º dia do período analisado (23/01/2009), com 50% de infiltração, através do método de Spencer.

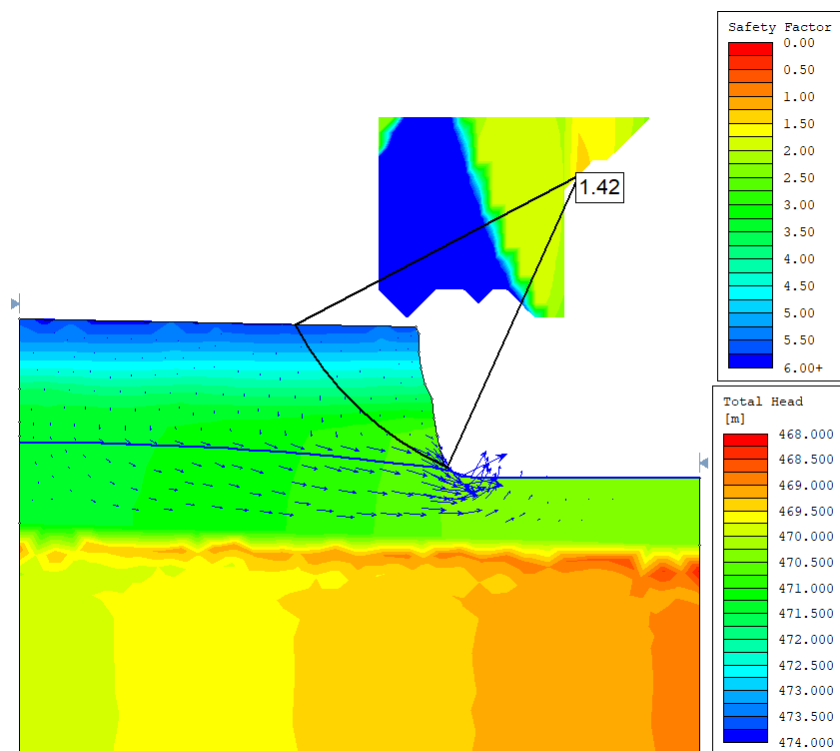


Figura 104 – Resultado da análise de estabilidade do 10º dia do período analisado (24/01/2009), com 50% de infiltração, através do método de Spencer.

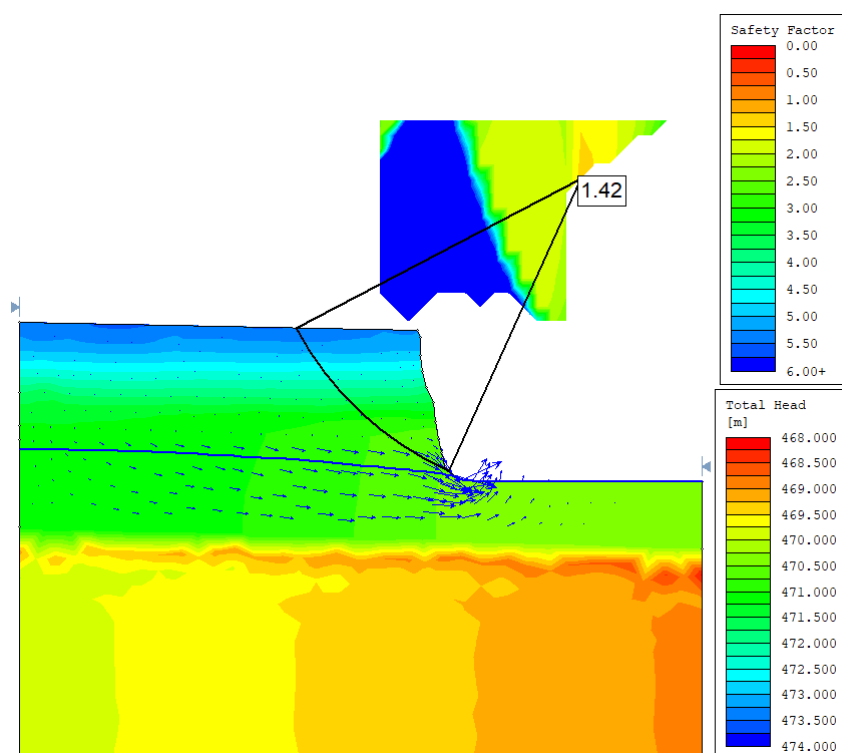


Figura 105 – Resultado da análise de estabilidade do 11º dia do período analisado (25/01/2009), com 50% de infiltração, através do método de Spencer.

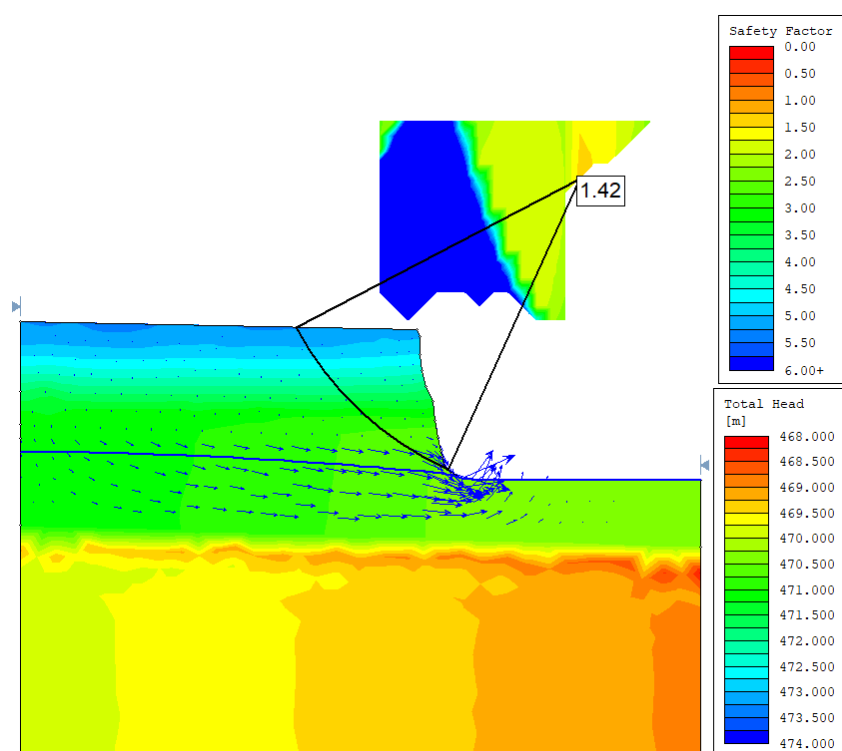


Figura 106 – Resultado da análise de estabilidade do 12º dia do período analisado (26/01/2009), com 50% de infiltração, através do método de Spencer.

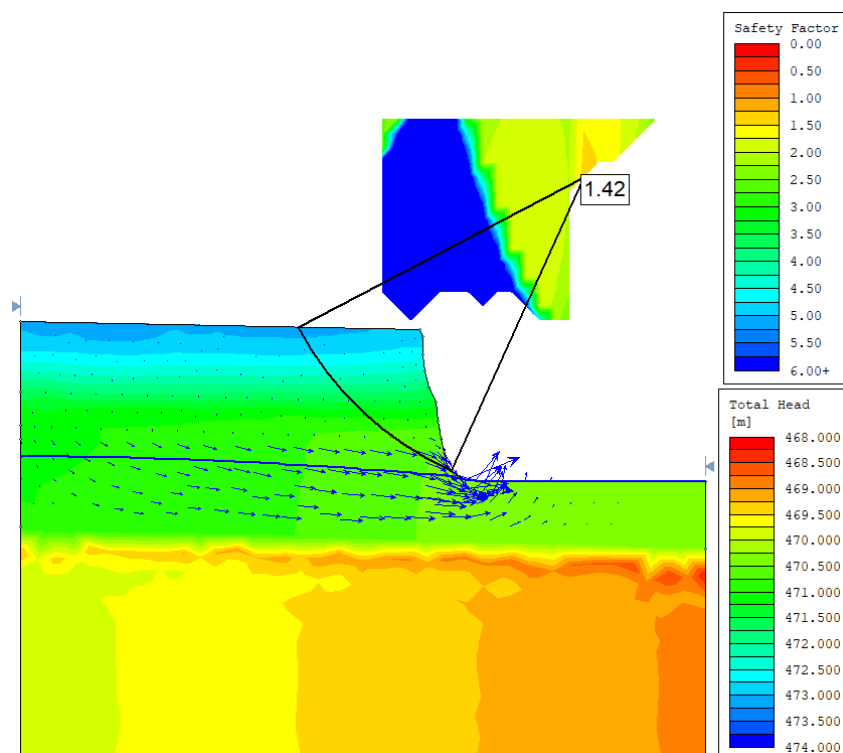


Figura 107 – Resultado da análise de estabilidade do 13º dia do período analisado (27/01/2009), com 50% de infiltração, através do método de Spencer.

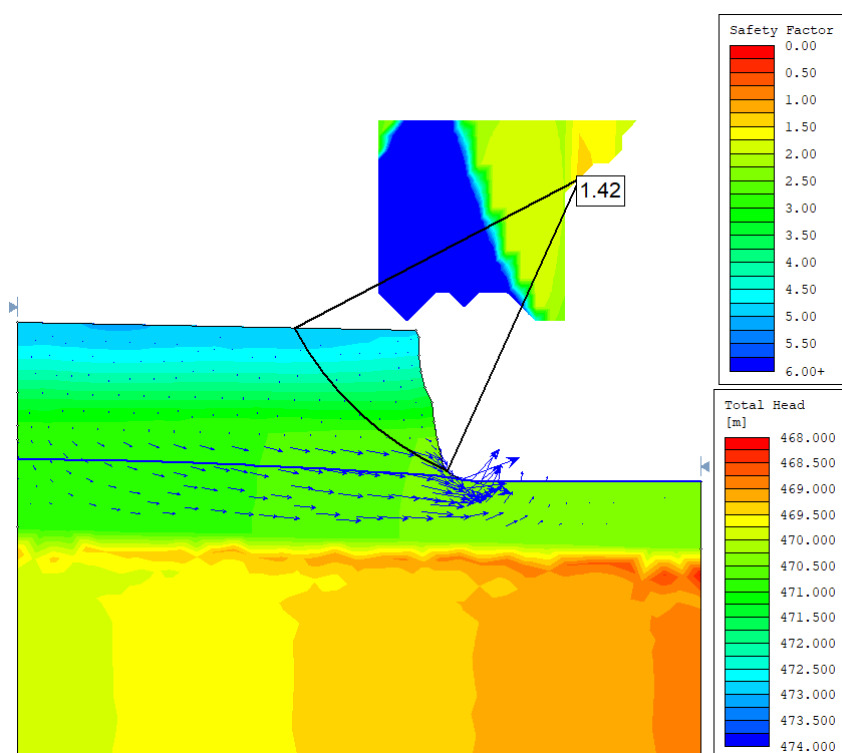


Figura 108 – Resultado da análise de estabilidade do 14º dia do período analisado (28/01/2009), com 50% de infiltração, através do método de Spencer.

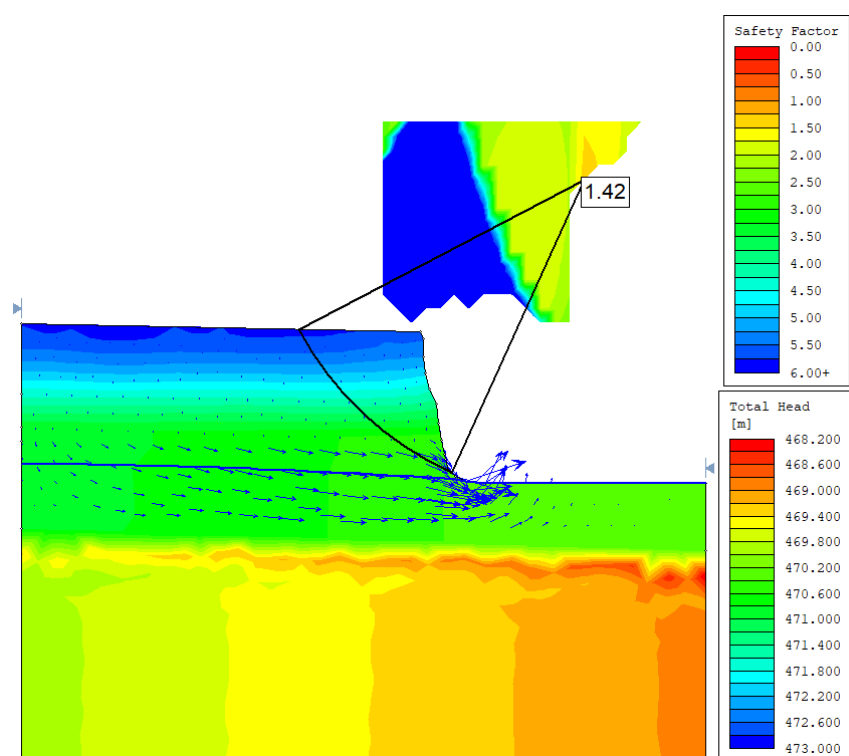


Figura 109 – Resultado da análise de estabilidade do 15º dia do período analisado (29/01/2009), com 50% de infiltração, através do método de Spencer.

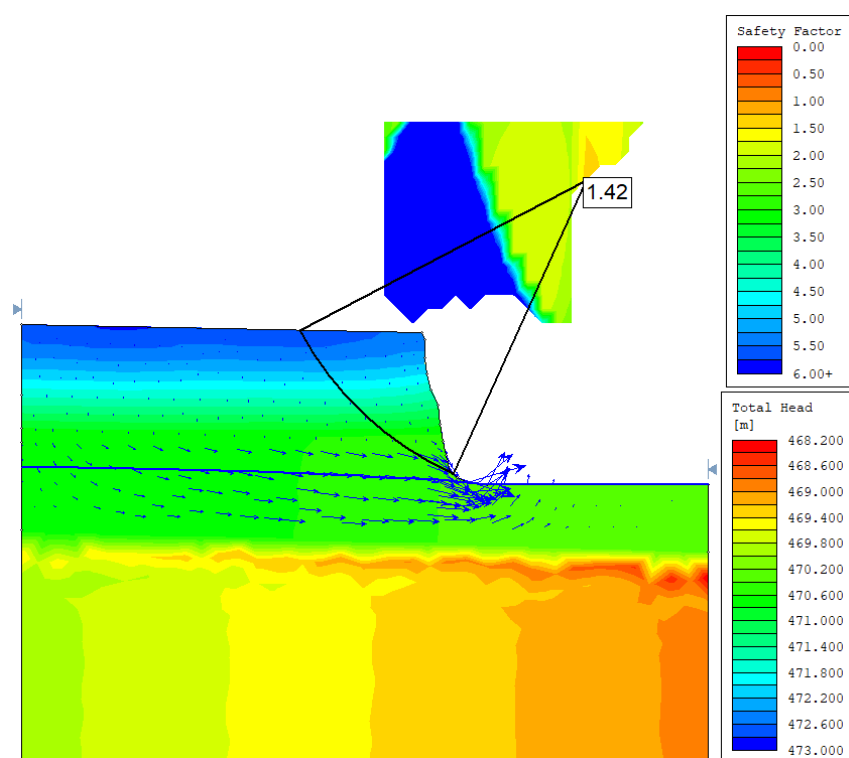


Figura 110 – Resultado da análise de estabilidade do 16º dia do período analisado (30/01/2009), com 50% de infiltração, através do método de Spencer.

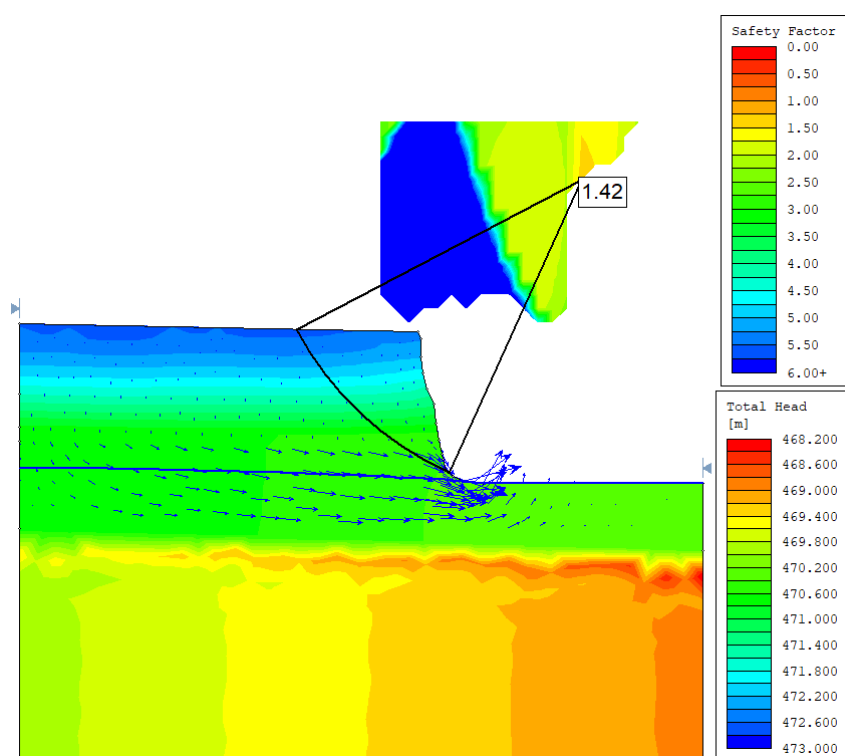


Figura 111 – Resultado da análise de estabilidade do 17º dia do período analisado (31/01/2009), com 50% de infiltração, através do método de Spencer.